

Józef Szubert*, Włodzimierz Ziółkowski*
Alicja Szymańska-Paszczuk*, Wojciech Wieczorek**
Marietta Szubert*

WYZNACZANIE MAKSYMALNYCH PARAMETRÓW FIZJOLOGICZNYCH SERCA KOBIEC PODCZAS PRZEJŚCIA OD MŁODOŚCI DO WIEKU STARSZEGO

Streszczenie. Podczas przejścia od młodości do wieku starszego maksymalne parametry fizjologiczne serca kobiet ulegają zmniejszeniu. Na podstawie światowych danych doświadczalnych, dotyczących badań przekrojowych i longitudinalnych zmian maksymalnych parametrów fizjologicznych serca kobiet w procesie starzenia się, stosując analizę matematyczną oraz modelowanie matematyczne i symulację komputerową, opracowano innowacyjne, kompleksowe i wiarygodne metody wyznaczania maksymalnych parametrów fizjologicznych serca kobiet: rzutu minutowego serca (CO_{max}), częstości pracy serca (HR_{max}), objętości wyrzutowej serca (SV_{max}), różnicy tętniczko-żylnego wysycenia krwi tlenem (AVD_{max}) oraz pułapu tlenowego (Vo_{2max}).

Opracowane metody pozwalają każdy maksymalny parametr fizjologiczny serca dla dużej i przeciętnej wydolności kobiet przedstawić: graficznie (za pomocą wykresu), analitycznie (za pomocą równania matematycznego) oraz tabelarycznie. Takie opracowanie maksymalnych parametrów fizjologicznych serca kobiet pozwala dla dowolnego wieku i rozpatrywanej wydolności fizycznej wyznaczyć w przekroju poprzecznym wszystkie maksymalne parametry serca: CO_{max} , HR_{max} , SV_{max} , AVD_{max} oraz Vo_{2max} .

Słowa kluczowe: fizjologiczne starzenie się, maksymalne parametry fizjologiczne serca kobiet.

Defining the maximum physiological parameters of women's hearts in the transition from youth to old age

Summary. During the transition from youth to old age the maximum physiological parameters of women's hearts are reduced. Based on the global experimental data refereeing to the cross-sectional studies and longitudinal changes in maximum physiological parameters of the heart in the aging process, using mathematical analysis and mathematical modeling and computer simulation, the authors have developed an innovative, comprehensive and reliable method

* Wyższa Szkoła Informatyki i Umiejętności, Wydział Pedagogiki i Promocji Zdrowia, 93-008 Łódź, ul. Rzgowska 17, jszubert@onet.eu; wlodzimierz_ziolkowski@wsinf.edu.pl; alicja_szymanska-paszczuk@wsinf.edu.pl; mszubert90@gmail.com

** Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk o Wychowaniu, Pracownia Wychowania Fizycznego i Zdrowotnego, 91-408 Łódź, Pomorska 46/48, wieczo3@uni.lodz.pl

for determining the maximum of physiological parameters of heart: cardiac output (CO_{max}) heart rate (maximum heart rate), stroke volume (SV_{max}), difference arterio-venous oxygen saturation (AVD_{max}) and oxygen uptake (Vo_{2max}).

The developed methods allow presentation of every maximum physiological parameter of the heart for the large and average endurance of women: a graphical presentation (with the use of a graph), an analytical presentation (using a mathematical equation) and in the tabular form. Such development of the maximum of physiological parameters allows determination of all the maximum heart parameters of women at any age and of any physical condition in a cross-section of all the parameters of maximum heart: CO_{max} , maximum heart rate, SV_{max} , AVD_{max} and Vo_{2max} .

Keywords: physiological aging, the maximum physiological parameters of women's hearts.

Wstęp

Życie człowieka dzieli się na dwa podstawowe okresy (Laskowska-Szcześniak, Kozak-Szkopek, 2013; Marchewka i in., 2013; Plowman, Smith, 2014; Sieck, 2003; Taylor, Johnson, 2008; Żołądź, Majerczak, 2011):

1. Okres rozwoju, czyli wzrastania, dojrzewania i osiągnięcia największej biologicznej sprawności organizmu. Okres ten trwa do około 25. roku życia.

2. Okres pogarszania się homeostazy i czynności poszczególnych narządów oraz zmniejszania się zdolności do znoszenia obciążeń. Okres ten, to okres starzenia się. Starzenie się jest powszechnym i naturalnym procesem życiowym.

U człowieka po około dwudziestopięcioletnim okresie wzrastania i dojrzewania, zaczynają postępować w następnych latach życia zmiany struktury i funkcji. Są one: (1) uniwersalne, (2) stopniowe, (3) spontaniczne, (4) nieodwracalne, (5) niekorzystne (z osobniczego punktu widzenia). Efekty zmian starczych dotyczą wielu sfer życia: zmniejsza się sprawność fizyczna, maleje wydolność psychiczna oraz wyczerpuje się aktywność socjalna (Conn, 2006; Correia i in., 2002; Fleg i in., 1995; Guyton, Hall, 2005; Houghton, 2015; Jackson i in., 2012; Kenney i in., 2015; Kozłowski, Nazar, 1999; Pollock i in., 2015).

Ze względu na osiągnięty wiek, osoby starsze można podzielić na kilka grup wiekowych, których umowne granice, według Światowej Organizacji Zdrowia, są obecnie następujące (Marchewka i in. 2013; WHO 2012; Żołądź, Majerczak, 2011):

- 1) wiek przedstarczy – od 45 do 59 lat;
- 2) wczesna starość – od 60 do 74 lat;
- 3) późna starość – od 75 do 89 lat;
- 4) długowieczność – powyżej 90. roku życia.

Trudno jest dokładnie uchwycić wpływ starzenia się organizmu na parametry fizjologiczne serca i wydolność fizyczną, gdyż styl życia może przyspieszyć lub opóźnić ten proces. Niekiedy ludzie już w wieku 30–35 lat, ze względu na brak aktywności ruchowej, otyłość, palenie tytoniu czy złe odżywianie się, mogą prezentować dużo bardziej zaawansowany etap starzenia się organizmu, niż wynikałoby to z ich metryki urodzenia. Inni natomiast nie przejawiają większych objawów starzenia się i są aktywni fizycznie w wieku 70–80 lat. Z tego wynika, że ludzie w tym samym wieku kalendarzowym mogą

mieć bardzo różny wiek biologiczny. Należy podkreślić, że duży wpływ na przebieg tych zmian mają czynniki genetyczne (Brandfonbrener i in., 1995; Dai i in., 2015; Gault i in., 2013; Houghton i in., 2015; Keleman, 1977; Kenney, Munce, 2003; Kenney, 1997; Kozłowski, Nazar, 1999; Kwon i in., 2014; Manini, 2010; Pandolf, 1991; Rogasta, 2008; Sharma, Goodwin, 2006; Vogelaere, Pereira, 2005; Wieczorkowska-Tobis, 2008).

Jak wynika z wielu badań, zwiększona aktywność fizyczna w niewielkim stopniu doprowadza do wydłużenia czasu przeżycia, ale znacznie poprawia jakość życia, rozumianą jako zdolność do wykonywania podstawowych czynności życiowych, takich jak: poruszanie się, ubieranie, dbanie o higienę, jedzenie, a także zachowanie zdrowia (Guyton, Hall, 2005; Jackson i in., 2012; Keleman, 1977; Kenney i in., 2015; Kozłowski, Nazar, 1999; Marchewka i in., 2013).

Należy zaznaczyć, że starzenie się wpływa nieuchronnie na wartości parametrów fizjologicznych serca człowieka. Zmiany mogą być analizowane poprzez obserwacje długofalowe (longitudinalne) bądź przekrojowe (Aniansson i in., 1983; Cooper i in., 2013; Daskalski, 2009; Dehn, Bruce, 1972; Dill i in., 1958; Era, Rantanen, 1997; Hawkins i in., 2001; Hollenberg i in., 2006; Jackson i in., 2009, 2012; Kaess i in., 2012; Kenney i in., 2015; Kohara i in., 2005; Lindeman i in., 1985; Plowman, Smith, 2014; Robinson i in., 1975; Sorkin i in., 1999; Stathokostas i in., 1985; Strait, Lakatt, 2012). W każdym z tych przypadków mogą istnieć problemy interpretacyjne, wynikające z niekompletnych danych z całej populacji, spadku aktywności fizycznej, zmian składu ciała i zmian stylu życia. Stosunkowo często badania dotyczą osób w wieku umownie określanym jako średni (40–65 lat) oraz starszy (65–75 lat), rzadziej obejmują one osoby powyżej tego wieku, nazwanego późną starością (Cooper i in., 2013; Era, Rantanen, 1997; Ferraro, Kelley-Moore, 2003; Jackson i in., 2009; Kozłowski, Nazar, 1999).

W badaniach longitudinalnych brane są pod uwagę: (1) tor zdrowego i (2) zwykłego starzenia się. Aby dokonać analizy maksymalnych parametrów fizjologicznych serca człowieka przy przejściu od młodości do wieku starszego, autorzy pracy korzystali z danych różnych polskich i zagranicznych źródeł (Daskalski, 2009; Dill i in., 1958; Era, Rantanen, 1997; Ferraro, Kelley-Moore, 2003; Fleg i in., 2005; Guyton, Hall, 2005; Hollenberg i in., 2006; Houghton i in., 2015; Jackson i in., 2012; Kaess i in., 2012; Kenney i in., 2015; Kozłowski, Nazar, 1999; Lindeman i in., 1985; Marchewka i in., 2013; Plowman, Smith, 2014; Rogasta, 2008; Sessions, Engler, 2016; Sieck, 2003).

Wiele parametrów fizjologicznych zależy od masy i wysokości ciała. Kobiety mają mniejszą masę i wysokość ciała, co wpływa na wartości ich parametrów fizjologicznych. Dorosłe kobiety są średnio o 7–8% niższe (8–12 cm) i o 25–30% lżejsze (12–18 kg) od mężczyzn w tym samym wieku. Mniejszy staje się też relatywny udział masy mięśniowej u kobiet w ogólnej masie ciała, natomiast większa jest zawartość tłuszczu w organizmie. U młodych kobiet wynosi ona średnio 22–25%, a u mężczyzn 15–17%. Wszystkie te cechy są uwarunkowane genetycznie (Kaess i in., 2012; Kenney i in., 2015; Kozłowski,

Nazar, 1999; Magiera i in., 2012; Ogonowska-Słodownik i in., 2016; Plowman, Smith, 2014).

Czynnikami oddziałującymi na reakcje wysiłkowe są: wielkość masy mięśniowej oraz wysokość ciała. Obie te składowe wpływają na różne reakcje kobiet na wysiłek fizyczny w porównaniu z mężczyznami. Dlatego parametry fizjologiczne serca kobiet podczas wysiłków fizycznych są rozpatrywane oddzielnie. Wartości maksymalnych parametrów fizjologicznych serca kobiet (a także mężczyzn) zależą od ich wydolności fizycznej, której miarą jest maksymalny minutowy pobór tlenu (pułap tlenowy, Vo_{2max}). Uważa się, że w warunkach fizjologicznych młodych zdrowych osób, najważniejszym czynnikiem warunkującym Vo_{2max} jest wartość maksymalnej pojemności minutowej serca (CO_{max}). Wykazano, że w procesie starzenia się maksymalny pobór tlenu (Vo_{2max}) i maksymalna pojemność minutowa serca (CO_{max}) systematycznie maleją. Zmniejszanie maksymalnej pojemności minutowej serca w procesie starzenia się jest wynikiem spadku maksymalnej częstości skurczów serca (HR_{max}) i maksymalnej objętości wyrzutowej serca (SV_{max}) (Kaess i in., 2012; Kenney i in., 2015; Kozłowski, Nazar, 1999; Magiera i in., 2012; Ogonowska-Słodownik i in., 2016; Plowman, Smith, 2014):

$$Vo_{2max} = CO_{max} \cdot AVD_{max} = HR_{max} \cdot SV_{max} \cdot AVD_{max}$$

W prezentowanej pracy badane zmiany maksymalnych parametrów fizjologicznych serca człowieka, przy przejściu od młodości do wieku starszego, są rozpatrywane dla kobiet o dużej i przeciętnej wydolności fizycznej.

Celem pracy jest wyznaczenie maksymalnych parametrów fizjologicznych serca kobiet o dużej i przeciętnej wydolności fizycznej, przy przejściu od młodości do wieku starszego.

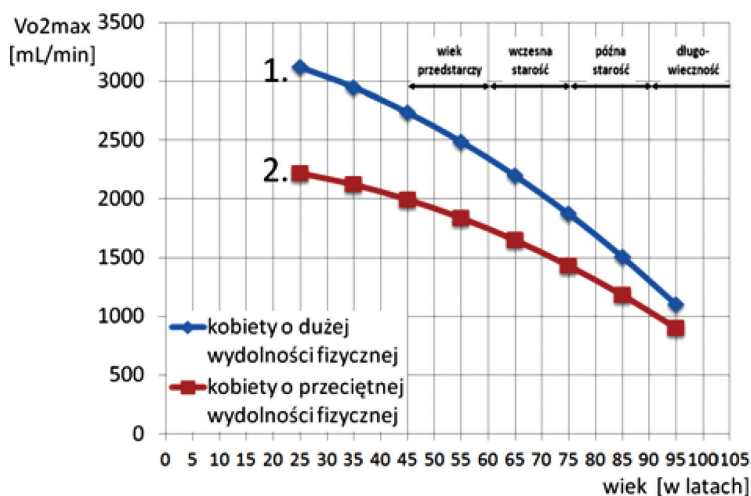
Material i metody

Na podstawie polskich i światowych danych empirycznych stwierdza się wpływ starzenia się na wartości parametrów fizjologicznych serca człowieka podczas przejścia od młodości do wieku starszego (Daskalski, 2009; Fleg i in., 2005; Gault i in., 2013; Houghton i in., 2015; Keleman, 1977; Kenney i in., 2015; Lakatta, 2002; Mann i in., 2015; Plowman, Smith, 2014; Rogasta, 2008; Sessions, Engler, 2016). Zmiany mogą być analizowane poprzez obserwacje długofalowe (longitudinalne) lub przekrojowe (Aniansson i in., 1983; Cooper i in., 2013; Dehn, Bruce, 1972; Dill i in., 1958; Ferraro, Kelley-Moore, 2003; Hawkins i in., 2001; Hollenberg i in., 2006; Jackson i in., 2009; Kohara i in., 2005; Lindeman i in., 1985; Plowman, Smith, 2014; Sorkin i in., 1999; Stathokostas i in., 1985; Strait, Lakatt, 2012). W badaniach longitudinalnych autorzy pracy brali pod uwagę: (1) typ zdrowego i (2) zwykłego starzenia się. Aby wyznaczyć maksymalne parametry

fizjologiczne serca kobiet: maksymalny minutowy pobór tlenu (Vo_{2max}), maksymalną pojemność minutową serca (CO_{max}), maksymalną częstość pracy serca (HR_{max}), maksymalną objętość wyrzutową serca (SV_{max}) oraz maksymalną różnicę tętniczo-żylną wysycenia krwi tlenem (AVD_{max}), autorzy pracy korzystali z różnych danych, dostępnych w polskich i zagranicznych źródłach (Daskalski, 2009; Dehn, Bruce, 1972; Dill i in., 1958; Edelstein-Keshet i in., 2001; Era, Rantanen, 1997; Fleg i in., 2005; Gault i in., 2013; Hawkins i in., 2001; Houghton i in., 2015; Jackson i in., 2012; Kaess i in., 2012; Kenney i in., 2015; Kohara i in., 2005; Kozłowski, Nazar, 1999, Marchewka i in., 2013; Plowman, Smith, 2014; Robinson i in., 1975; Stephad, 1998). Znając światowe dane doświadczalne, dotyczące różnych badań przekrojowych i longitudinalnych zmian maksymalnych parametrów fizjologicznych serca kobiet w procesie starzenia się, stosując analizę matematyczną oraz modelowanie matematyczne i symulację komputerową, opracowano innowacyjne, kompleksowe i wiarygodne metody wyznaczania wymienionych maksymalnych parametrów fizjologicznych serca kobiet (Kowald 2009; Novoseltsev, Mikhalskii, 2011; Ottesen i in., 2006; Ritter i in., 2005; Szubert, 1981). Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w postaci graficznej (za pomocą wykresów), analitycznej (za pomocą równań) oraz tabelarycznej.

Wyniki badań

1. Maksymalny minutowy pobór tlenu u kobiet – Vo_{2max}



Ryc. 1. Zmiany Vo_{2max} u kobiet o dużej (1.) i przeciętnej (2.) wydolności fizycznej przy przejściu od młodości do wieku starszego

Źródło: wyniki badań własnych.

Równania opisujące zmiany Vo_{2max} u kobiet o dużej (1.) i przeciętnej (2.) wydolności fizycznej w funkcji wieku:

$$1. V_{O_{2max}} = -0,19524W^2 - 5,42857W + 3377,738 \text{ [mL/min]},$$

$$2. V_{O_{2max}} = -0,15357W^2 - 0,42857W + 2326,696 \text{ [mL/min]},$$

gdzie:

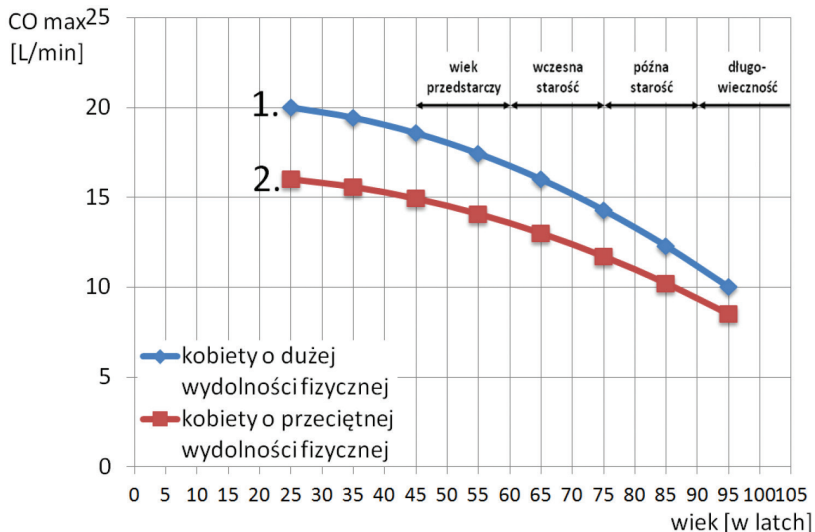
W – wiek w latach.

Tabela 1. Wartości Vo_{2max} dla kobiet o dużej i przeciętnej wydolności fizycznej dla określonego wieku

Wiek [w latach]	25	35	45	55	65	75	85	95
Kobiety o dużej wydolności fizycznej [mL/min] i w [%]	3120 100	2949 94,5	2738 87,7	2489 79,7	2200 70,5	1872 60,0	1506 48,3	1100 35,3
Kobiety o przeciętnej wydolności fizycznej [mL/min] i w [%]	2220 100	2124 95,7	1996 89,9	1839 82,8	1650 74,3	1431 64,4	1181 53,2	900 40,5

Źródło: wyniki badań własnych.

2. Maksymalna pojemność minutowa serca u kobiet (maksymalny rzut minutowy serca) – CO_{max}



Ryc. 2. Zmiany CO_{max} u kobiet o dużej (1.) i przeciętnej (2) wydolności fizycznej przy przejściu od młodości do wieku starszego

Źródło: wyniki badań własnych.

Równania opisujące zmiany CO_{max} u kobiet o dużej (1.) i przeciętnej (2.) wydolności fizycznej w funkcji wieku:

$$1. CO_{max} = -0,001429W^2 + 0,028571W + 20,17857 \text{ [L/min]},$$

$$2. CO_{max} = -0,001071W^2 + 0,021429W + 16,13393 \text{ [L/min]},$$

gdzie:

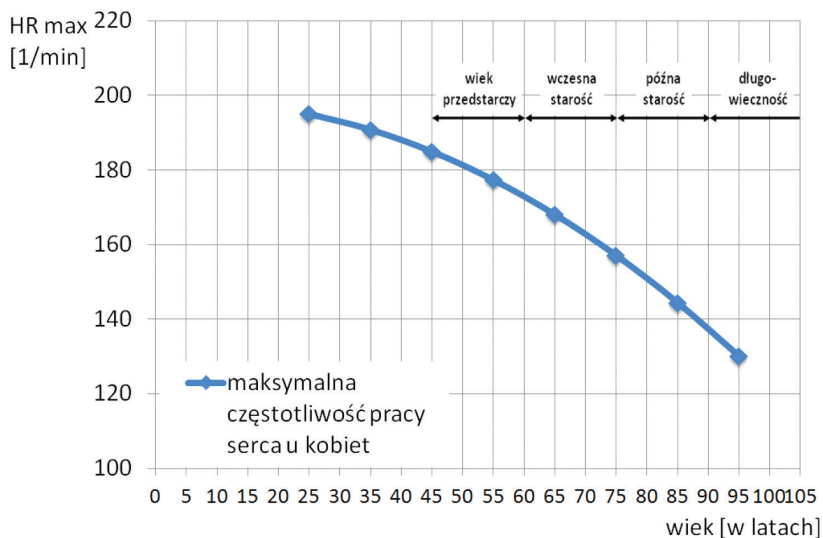
W – wiek w latach.

Tabela 2. Wartości CO_{max} dla kobiet o dużej i przeciętnej wydolności fizycznej dla określonego wieku

Wiek [w latach]	25	35	45	55	65	75	85	95
Maksymalny rzut minutowy dla kobiet o dużej wydolności fizycznej [l/min] i w [%]	20,0 100	19,4 97,1	18,6 92,9	17,4 87,1	16,0 80,0	14,3 71,4	12,3 61,4	10,0 50,0
Maksymalny rzut minutowy dla kobiet o przeciętnej wydolności fizycznej [l/min] i w [%]	16,0 100	15,6 97,3	14,9 93,3	14,1 87,9	13,0 81,3	11,7 73,2	10,2 63,8	8,5 53,1

Źródło: wyniki badań własnych.

3. Maksymalna częstość skurczów serca u kobiet – HR_{max}



Ryc. 3. Zmiany HR_{max} u kobiet o dużej i przeciętnej wydolności fizycznej zachodzą tak samo przy przejściu od młodości do wieku starszego

Źródło: wyniki badań własnych.

Równanie opisujące zmiany HR_{max} u kobiet o dużej i przeciętnej wydolności fizycznej w funkcji wieku:

$$HR_{max} = -0,00845W^2 + 0,085714W + 198,1399 \text{ [1/min]},$$

gdzie:

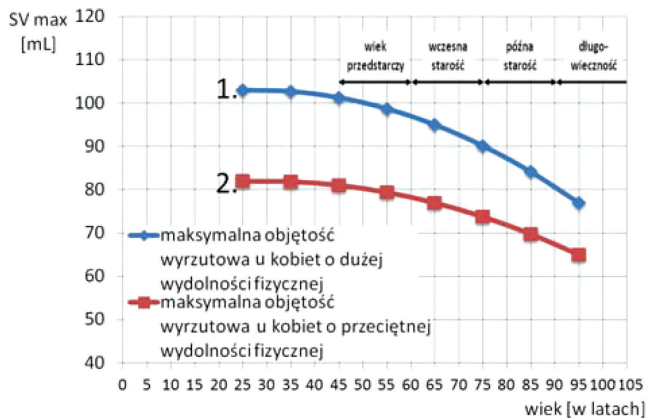
W – wiek w latach.

Tabela 3. Wartość HR_{max} dla kobiet o dużej i przeciętnej wydolności fizycznej dla określonego wieku

Wiek [w latach]	25	35	45	55	65	75	85	95
Maksymalna częstotliwość pracy serca u kobiet [1/min] i w [%]	195,0 100	190,8 97,8	184,9 94,8	177,3 90,9	168,0 86,2	157,0 80,5	144,4 74,0	130,0 66,7

Źródło: wyniki badań własnych.

4. Maksymalna objętość wyrzutowa serca u kobiet – SV_{max}



Ryc. 4. Zmiany SV_{max} u kobiet o dużej (1.) i przeciętnej (2.) wydolności fizycznej przy przejściu od młodości do wieku starszego

Źródło: wyniki badań własnych.

Równania opisujące zmiany SV_{max} u kobiet o dużej i przeciętnej wydolności fizycznej w funkcji wieku:

$$1. SV = \frac{CO_{max}}{HR_{max}} = \frac{-0,001429W^2 + 0,028571W + 20,17857}{-0,00845W^2 + 0,085714W + 198,1399} \text{ [mL]},$$

$$2. SV = \frac{CO_{max}}{HR_{max}} = \frac{-0,001071W^2 + 0,021429W + 16,13393}{-0,00845W^2 + 0,085714W + 198,1399} \text{ [mL]},$$

gdzie:

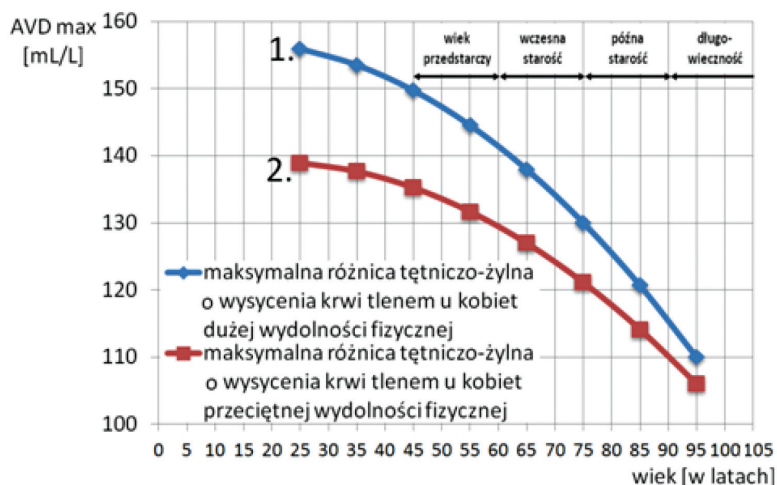
W – wiek w latach.

Tabela 4. Wartości SV_{\max} dla kobiet o dużej i przeciętnej wydolności fizycznej dla określonego wieku

Wiek [w latach]	25	35	45	55	65	75	85	95
SV_{\max} – dla kobiet o dużej wydolności fizycznej [mL] i w [%]	103,0 100	102,7 99,7	101,3 98,3	98,7 95,8	95,0 92,2	90,1 87,5	84,1 81,7	77,0 74,8
SV_{\max} – dla kobiet o przeciętnej wydolności fizycznej [mL] i w [%]	82,0 100	81,9 99,9	81,1 98,9	79,4 96,9	77,0 93,9	73,8 90,0	69,8 85,1	65,0 79,3

Źródło: wyniki badań własnych.

5. Maksymalna różnica tętniczo-żylna zawartości tlenu we krwi u kobiet – AVD_{\max}



Ryc. 5. Zmiany AVD_{\max} dla kobiet o dużej (1.) i przeciętnej (2.) wydolności fizycznej przy przejściu od młodości do wieku starszego

Źródło: wyniki badań własnych.

Równania opisujące zmiany AVD_{\max} u kobiet o dużej i przeciętnej wydolności fizycznej w funkcji wieku:

$$1. AVD_{\max} = \frac{Vo_2 \max}{CO \max} = \frac{-0,19524W^2 - 5,42857W + 3377,738}{-0,001429W^2 + 0,028571W + 20,17857} \text{ [mL/L]},$$

$$2. AVD_{\max} = \frac{Vo_2 \max}{CO \max} = \frac{-0,15357W^2 - 0,42857W + 2326,696}{-0,001071W^2 + 0,021429W + 16,13393} \text{ [mL/L]},$$

gdzie:

W – wiek w latach.

Tabela 5. Wartości AVD_{max} dla kobiet o dużej i przeciętnej wydolności fizycznej dla określonego wieku

Wiek [w latach]	25	35	45	55	65	75	85	95
AVD_{max} dla kobiet o dużej wydolności fizycznej [ml/L] i w [%]	156,0 100	153,6 98,4	149,8 96,0	144,6 92,7	138,0 88,5	130,0 83,4	120,7 77,4	110,0 70,5
AVD_{max} dla kobiet o przeciętnej wydolności fizycznej [ml/L] i w [%]	139,0 100	137,7 99,1	135,3 97,3	131,7 94,8	127,0 91,4	121,1 87,2	114,1 82,1	106,0 76,3

Źródło: wyniki badań własnych.

Omówienie

Na ryc. 1 przedstawiono zmiany Vo_{2max} u kobiet o dużej i przeciętnej wydolności fizycznej przy przejściu od młodości do wieku starszego, zaznaczając liczbami wykresy: 1. dla osób dużej wydolności fizycznej, 2. dla osób o przeciętnej wydolności fizycznej. Zaznaczono także przedziały: wieku przedstarczego, wczesnej starości, późnej starości i długowieczności, aby ułatwić analizę spadku pułapu tlenowego w poszczególnych okresach starości. Równania 1. i 2. opisują zmiany Vo_{2max} u kobiet o dużej (1.) i przeciętnej (2.) wydolności fizycznej w funkcji wieku (W), pozwalające wyznaczyć pułap tlenowy dla osoby o danej wydolności fizycznej i danego wieku. W tabeli 1. przedstawiono Vo_{2max} dla kobiet o dużej i przeciętnej wydolności fizycznej dla określonego wieku w wartościach bezwzględnych i względnych (w ujęciu procentowym).

W analogiczny sposób przedstawiono pozostałe maksymalne parametry fizjologiczne serca kobiet przy przejściu od młodości do wieku starszego: maksymalny rzut minutowy serca, maksymalną częstość pracy serca, maksymalną objętość wyrzutową serca oraz maksymalną różnicę tętniczo-żylną wysycenia krwi tlenem.

Należy zaznaczyć, że wszystkie zaprezentowane wykresy są krzywoliniowe, wbrew temu, co twierdzi znaczna część badaczy (Dehn, Bruce, 1972; Górski, 2008; Kenney i in., 2015; Kozłowski, Nazar, 1999; Marchewka i in., 2013; Plowman, Smith, 2014). Równania opisujące: maksymalny minutowy pobór tlenu (Vo_{2max}), maksymalny rzut minutowy serca (CO_{max}) i maksymalną częstość pracy serca (HR_{max}) są równaniami kwadratowymi. Natomiast maksymalna objętość wyrzutowa (SV_{max}) i maksymalna różnica tętniczo-żylna wysycenia krwi tlenem (AVD_{max}) opisują ilorazy równań kwadratowych. W przypadku wszystkich maksymalnych parametrów fizjologicznych serca człowieka największe zmniejszenie tych parametrów dotyczy najpóźniejszych okresów życia, co

uwidaczniają wykresy i ujęcia tabelaryczne oraz potwierdzają liczni autorzy (Era, Rantanen, 1997; Fox, 2008; Guyton, Hall, 2005; Kenney i in., 2015).

Wartość maksymalnego minutowego poboru tlenu jest uwarunkowana głównie przez pojemność minutową serca oraz różnicę tętniczo-żylną zawartości tlenu we krwi (Gault i in., 2013; Kaess i in., 2012; Kenney i in., 2015; Kozłowski, Nazar, 1999; Marchewka i in., 2013; Plowman, Smith, 2014; Proctor i in., 1998; Rosen i in., 1998; Stathokostas i in., 1985; Żołądź, Marjerczak, 2011):

$$Vo_{2max} = CO_{max} \cdot AVD_{max} = SV_{max} \cdot HR_{max} \cdot AVD_{max}'$$

gdzie:

Vo_{2max} – maksymalny minutowy pobór tlenu (pułap tlenowy);

CO_{max} – maksymalna pojemność minutowa serca;

AVD_{max} – maksymalna różnica tętniczo-żylna zawartości tlenu we krwi;

SV_{max} – maksymalna objętość wyrzutowa serca;

HR_{max} – maksymalna częstość pracy serca.

Na szczególne podkreślenie zasługuje zależność funkcyjna między Vo_{2max} a parametrami krążeniowymi.

Mniejsze rozmiary ciała kobiet oraz mniejsza wielkość serca decydują w dużej mierze o wartości objętości wyrzutowej serca, a to powoduje, że Vo_{2max} jest u kobiet mniejsze niż u mężczyzn (Guyton, Hall, 2005; Kaess i in., 2012; Kenney i in., 2015; Ogonowska-Słodownik i in., 2016; Plowman, Smith, 2014; Sessions, Engler, 2016).

Zmniejszenie z wiekiem zdolności do wykonywania wysiłku fizycznego jest uwarunkowane zmniejszaniem maksymalnego poboru tlenu, siły mięśni oraz zwiększeniem zawartości tkanki tłuszczowej (Aniansson i in., 1983; Fox, 2008, Frontera i in., 2000; Górski, 2008; Jackson i in., 2012; Kenney i in., 2015; Manini, 2010; Marchewka i in., 2013; Ogonowska-Słodownik i in., 2016; Stephad, 1998; Ueno i in., 2014).

Trening fizyczny nie zatrzymuje procesów starzenia się, lecz pozwala utrzymać aktywność ruchową na znacznie wyższym poziomie w porównaniu z osobami nietreningującymi (Gille, 2010; Guyton, Hall, 2005; Jackson i in., 2009; Jaskólski, Jaskólska, 2006; Kenney i in., 2015; Kozłowski, Nazar, 1999; Marchewka i in., 2013; Mizera, Pilis, 2010; Ogawa i in., 1992; Plowman, Smith, 2014; Pollock i in., 2015; Powers, Howley, 2009; Stratton i in., 1994; Tarasova i in., 2013; Taylor, Johnson, 2008; Tipton, Franklin, 2006; Westerterp, Meijer, 2001).

Jak wcześniej podkreślono, maksymalny pobór tlenu w dużej mierze zależy od pojemności minutowej serca. Ta jednak jest u kobiet mniejsza z powodu mniejszej objętości serca, która wynosi około 550 mL (u mężczyzn około 750 mL). Istnieją również różnice dotyczące masy serca, która wynosi odpowiednio: około 250 g i 300 g. Maksymalne wartości pojemności minutowej serca, osiągnane przez osoby starsze, są mniejsze niż u osób młodszych w wyniku

mniej objętości wyrzutowej i mniejszej częstości pracy serca ($CO = SV \cdot HR$) (Cheitlin, 2003; Gault i in., 2013; Jaskólski, Jaskólska, 2006; Kenney i in., 2015; Kozłowski, Nazar, 1999; Marchewka i in., 2013; Olivetti i in., 1995; Tipton, Franklin, 2006).

Maksymalne wartości tętna u kobiet są praktycznie takie same, jak u mężczyzn (a więc nie zależą od płci). Osiągana przez kobiety maksymalna pojemność minutowa serca, nawet u trenujących, rzadko przekracza 25 L/min i jest wyraźnie mniejsza niż u trenujących mężczyzn, którzy często osiągają wartości między 30–35 L/min (Guyton, Hall, 2005; Hossack, Bruce, 1982; Jaskólski, Jaskólska, 2006; Kenney i in., 2015; Plowman, Smith, 2014; Raff, Levitzky, 2011). Z tego wynika, że w wysiłku o maksymalnej intensywności objętość wyrzutowa u kobiet jest mniejsza niż u mężczyzn. Omówione wartości pojemności minutowej serca dotyczą osób młodych, w wieku około 25 lat (Guyton, Hall, 2005; Hossack, Bruce, 1982; Jaskólski, Jaskólska, 2006; Kenney i in., 2015; Plowman, Smith, 2014).

Układ krążenia zmienia swoje parametry wraz z wiekiem w następstwie starzenia się lub obniżenia aktywności ruchowej. Mięsień sercowy wykazuje zwiększoną grubość ścian lewej komory, co powoduje zwiększenie jego masy. Jest to związane ze wzrostem ciśnienia skurczowego, wywołanego głównie zwiększeniem sztywności ścian naczyń tętniczych (Franklin, 2005; Houghton i in., 2015; Kaess i in., 2012; Kozłowski, Nazar, 1999; Lakatta, 2002; Levy, 2001).

Należy podkreślić, że objętość wyrzutowa serca i pojemność minutowa serca w spoczynku nie różnią się u młodszych i starszych osób (Guyton, Hall, 2005; Jackson i in., 2009; Jaskólski, Jaskólska, 2006; Kaess i in., 2012; Kenney i in., 2015; Plowman, Smith, 2014).

Maksymalna częstość skurczów serca osiąga swoje najwyższe wartości (około 200–195/min) w wieku 20–25 lat i następnie stopniowo się obniża. Zmniejszanie częstości skurczów serca jest następstwem zmian morfologicznych i elektrofizjologicznych w układzie bodźcoprzewodzącym rozrusznika serca i pęczka Hisa, co może spowodować spowolnienie przewodnictwa w tym układzie. Poza tym przyczynami mogą być: mniejsza pobudliwość serca na działanie katecholaminy, zmniejszenie wydzielania katecholamin, większa sztywność ścian komór. Wykazano w badaniach własnych i innych autorów, że zmiany częstości pracy serca przy przejściu od młodości do wieku starszego zachodzą w sposób krzywoliniowy, a nie liniowy. Co więcej, zmiany te są takie same u kobiet o dużej i przeciętnej wydolności fizycznej (Guyton, Hall, 2005; Hossack, Bruce, 1982; Houghton i in., 2015; Jaskólski, Jaskólska, 2006; Kenney i in., 2015; Kozłowski, Nazar, 1999; Marchewka i in., 2013; Plowman, Smith, 2014; Robinson i in., 1975; Szubert, Szubert, 2015; Tanaka i in., 2001; Ueno i in., 2014).

U osób starszych, podczas wysiłku submaksymalnego w pozycji siedzącej, objętość wyrzutowa jest zbliżona do wartości uzyskiwanych przez młodsze osoby, czyli w granicach 90–100 mL. Podczas wysiłku maksymalnego objętość wyrzutowa jest jednak mniejsza niż u osób młodszych. Trudności z utrzymaniem

dużej objętości wyrzutowej podczas wysiłku maksymalnego mogą być spowodowane: słabszym ukrwieniem mięśnia sercowego, mniejszą odpowiedzią inotropową na katecholaminy, zmniejszoną kurczliwością mięśnia sercowego, mniejszą elastycznością komórek, a tym samym mniejszym wypełnieniem końcowo-rozkurczowym komórek, wzrostem obciążenia wywołanego większym oporem łożyska naczyniowego (Dill i in., 1958; Gault i in., 2013; Guyton, Hall, 2005; Houghton i in., 2015; Kaess i in., 2012; Kitzman, 2001; Kozłowski, Nazar, 1999; Lakatta, 2002; Lakatta, Levy, 2003).

Zmniejszenie maksymalnej objętości wyrzutowej oraz maksymalnej częstości skurczów serca wraz z wiekiem powoduje zmniejszenie maksymalnej pojemności minutowej serca, a ta, jak wiadomo, powoduje zmniejszenie wartości maksymalnego, minutowego poboru tlenu (Carrick-Ronson i in., 2013; Cheitlin, 2003; Dogra i in., 2012; Jackson i in., 2009; Jaskólski, Jaskólska, 2006; Kenney i in., 2015; Klabunde, 2011; Kozłowski, Nazar, 1999; Lakatta, 2001; Marchewka i in., 2013; Plowman, Smith, 2014; Powers, Howley, 2009; Saltin, Calbet, 2006):

$$Vo_{2max} = CO_{max} \cdot AVD_{max} = SV_{max} \cdot HR_{max} \cdot AVD_{max}$$

Różnica tętniczo-żylna zawartości tlenu we krwi jest drugim czynnikiem (zgodnie z regułą Ficka), decydującym o maksymalnym poborze tlenu przez organizm:

$$Vo_{2max} = CO_{max} \cdot AVD_{max} \text{ (reguła Ficka).}$$

Z tego wynika, że AVD jest mniejsze u kobiet z powodu mniejszej ilości krwi oraz mniejszej zawartości hemoglobiny. Zawartość hemoglobiny jest większa u mężczyzn (160 g/L) niż u kobiet (140 g/L) i z tego względu mają one mniejszą (o mniej więcej 20%) pojemność tlenową krwi. Również liczba erytrocytów różni kobiety od mężczyzn: u kobiet wynosi około 4,5 mln/mL, u mężczyzn około 5 mln/mL (Guyton, Hall, 2005; Jaskólski, Jaskólska, 2006; Kaess i in., 2012; Kenney i in., 2015; Klabunde, 2011; Kozłowski, Nazar, 1999; Marchewka i in., 2013; Plowman, Smith, 2014).

Warunkiem słuszności przedstawionych badań jest sprawdzian polegający na tym, że dla dowolnego wieku i badanej wydolności fizycznej kobiety, w przekroju poprzecznym, musi być spełnione równanie:

$$Vo_{2max} = CO_{max} \cdot AVD_{max} = SV_{max} \cdot HR_{max} \cdot AVD_{max}$$

zn. po podstawieniu odpowiednich wartości liczbowych obie strony równania muszą być sobie równe. We wszystkich przeprowadzonych badaniach ten warunek jest spełniony. Gdyby przyjąć, że niektóre parametry zmieniają się liniowo, jak twierdzi duża część badaczy, np. częstość pracy serca (HR), to wynik sprawdzianu byłby negatywny, zn. lewa strona równania nie byłaby równa jego prawej stronie.

Wnioski

1. Maksymalne parametry fizjologiczne serca u kobiet, przy przejściu od młodości do wieku starszego, należy rozpatrywać, uwzględniając wydolność fizyczną. Dlatego w przeprowadzonych badaniach wymienione parametry rozpatrywano dla kobiet o:

- a) dużej wydolności fizycznej;
- b) przeciętnej wydolności fizycznej.

2. Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w postaci:

- a) graficznej, za pomocą wykresów;
- b) analitycznej, za pomocą równań matematycznych;
- c) tabelarycznej.

3. Wszystkie otrzymane wykresy są krzywoliniowe, a nie prostoliniowe, jak sugeruje duża część badaczy.

4. Otrzymane wykresy dla kobiet i mężczyzn mają podobny przebieg, lecz leżą na różnych poziomach wartości

5. Wszystkie wykresy krzywoliniowe zostały opisane za pomocą równań kwadratowych lub za pomocą ilorazu równań kwadratowych.

6. Znajomość równań matematycznych, opisujących zmiany maksymalnych parametrów fizjologicznych serca podczas przejścia od młodości do wieku starszego, pozwala dla kobiety w dowolnym wieku, o dużej lub przeciętnej wydolności fizycznej wyznaczyć wszystkie rozpatrywane maksymalne parametry fizjologiczne serca.

7. W dowolnym przekroju poprzecznym, tzn. dla dowolnego wieku i badanej wydolności fizycznej kobiety, równanie:

$$Vo_{2max} = CO_{max} \cdot AVD_{max} = SV_{max} \cdot HR_{max} \cdot AVD_{max}$$

jest spełnione, tzn. jego lewa i prawa strona są sobie równe.

8. Wykonana przez autorów praca jest potwierdzeniem słów Immanuela Kanta, który uważa, że „w każdej dyscyplinie przyrodniczej może być tylko tyle rzeczywistej nauki, ile napotyka się tam matematyki”.

Bibliografia

- Aniansson A., Sperling L., Rundgren A., Lehnberg E., 1983, *Muscle Function in 75-year-old Men and Women. A Longitudinal Study*, „Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine. Supplement”, Vol. 9, s. 92–102.
- Brandfonbrener M., Landowne M., Shock N. W., 1995, *Changes in Cardiac Output with Age*, „Circulation”, Vol. 12 (4), s. 557–566.
- Carrick-Ronson G., Hasting J. L., Bhella P. S., Shibata S., Fujimoto N., Palmer D., Boyd K., Levine B. D., 2013, *The Effect of Age-related Differences in Body Size and Composition on Cardiovascular Determinants of Vo_{2max}* , „Journals of Gerontology. Series A: Biological Sciences and Medical Sciences”, Vol. 68 (5), s. 608–616.

- Cheitlin M. D., 2003, *Cardiovascular Physiology-changes with Aging*, „The American Journal of Geriatric Cardiology”, Vol. 12 (1), s. 1–3.
- Conn P. M., 2006, *Handbook of Models for Human Aging*, Elsevier, New York.
- Cooper J. A., Manini T. M., Paton Ch. M., Yamada Y., Everhart J. E., Cummings S., Mackey D. C., Newman A. B., Glynn N. W., Tylarsky F., Harris T., Schoeller D. A., 2013, *Longitudinal Change in Energy Expenditure and effects on Energy Requirements of the Elderly*, „Nutrition Journal”, Vol. 12, s. 73–88.
- Correia L. C. L., Lakatta E. G., O'Connor F. C., Becker L. C., Clulow J., Townsend S., Gerstenblith G., Fleg J. L., 2002, *Attenuated Cardiovascular Reserve during Prolonged Submaximal Cycle Exercise in Healthy Older Subjects*, „Journal of the American College of Cardiology”, Vol. 40 (7), s. 1290–1297.
- Dai X., Hummel S. L., Salazar J. B., Taffet G. E., Ziemann S., Schwartz J. B., 2015, *Cardiovascular Physiology in the Older Adults*, „Journal of Geriatric Cardiology”, Vol. 12 (3), s. 196–201.
- Daskalski A., 2009, *Handbook of Research on Systems Biology Applications in Medicine*, Medical Information Science Reference, New York.
- Dehn M. M., Bruce R. A., 1972, *Longitudinal Variations in Maximal Oxygen intake with Age and Activity*, „Journal of Applied Physiology”, Vol. 33 (6), s. 805–807.
- Dill D. B., Horvath S. M., Craig F. N., 1958, *Responses to exercise as related to age*, „Journal of Applied Physiology”, Vol. 12 (2), s. 195–196.
- Dogra S., Spencer M. D., Paterson D. H., 2012, *Higher cardiorespiratory fitness in older trained women is due to preserved stroke volume*, „Journal of Sports Science and Medicine”, Vol. 11, s. 745–750.
- Edelstein-Keshet L., Israel A., Lansdorp P., 2001, *Modeling perspectives on aging can mathematics help us stay young?*, „Journal of Theoretical Biology”, Vol. 213, s. 509–525.
- Era P., Rantanen T., 1997, *Changes in physical capacity and sensory/psychomotor functions from 75 to 80 years of age and from 80 to 85 years of age – a longitudinal study*, „Scandinavian Journal of Social Medicine. Supplement”, Vol. 53, s. 25–43.
- Ferraro K. F., Kelley-Moore J. A., 2003, *A half century of longitudinal methods in social gerontology: evidence of change in the journal*, „Journals of Gerontology. Series B: Psychological Sciences and Social Sciences”, Vol. 58 (5), s. 264–270.
- Fleg J. L., Morrell C. H., Bos A. G., Brant L. J., Talbot L. A., Wright J. G., Lakatta E. G., 2005, *Accelerated longitudinal decline of aerobic in healthy older adults*, „Circulation”, Vol. 112 (5), s. 624–682.
- Fleg J. L., O'Connor F., Gestenblith G., Becker L. C., Clulow J., Schulman S. P., Lakatta E. G., 1995, *Impact of age on the cardiovascular response to dynamic upright exercise in healthy men and women*, „Journal of Applied Physiology”, Vol. 78 (3), s. 890–900.
- Fox S., 2008, *Human physiology*, Mc Graw-Hill Companies, New York.
- Franklin S. S., 2005, *Arterial stiffness and hypertension*, „Hypertension”, Vol. 45, s. 349–351.
- Frontera W. R., Hughes V. A., Fielding R. A., Fiatarone M. A., Evans W. J., Roubenoff R., 2000, *Aging of skeletal muscle: a 12-yr longitudinal study*, „Journal of Applied Physiology”, Vol. 88 (4), s. 1321–1326.
- Gault M. L., Clements R. E., Willems M. E. T., 2013, *Cardiovascular responses during downhill treadmill walking at self-selected intensity in older adults*, „Journal of Aging and Physical Activity”, Vol. 21, s. 335–347.
- Gille D., 2010, *Overview of the physiological changes and optimal diet in the golden age generation over 50*, „European Review of Aging and Physical Activity”, Vol. 7 (1), s. 27–36.
- Górski J., 2008, *Fizjologiczne podstawy wysiłku fizycznego*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa.
- Guyton A., Hall J., 2005, *Textbook of medical physiology*, W. B. Saunders, Philadelphia.
- Hawkins S. A., Marcell T. J., Jague V. S., Wiswell R. A., 2001, *A longitudinal assessment of change in Vo_{2max} and Maxima heart rate in master athletes*, „Medicine and Science in Sports and Exercise”, Vol. 33 (10), s. 1744–1750.

- Hollenberg M., Yang J., Haight T. J., Tager J. B., 2006, *Longitudinal changes in aerobic capacity: implications for concepts of aging*, „Journals of Gerontology. Series A: Biological Sciences and Medical Sciences”, Vol. 61 (8), s. 851–858.
- Hossack K. F., Bruce R. A., 1982, *Maximal cardiac function in sedentary normal men and women: comparison of age-related changes*, „Journal of Applied Physiology”, Vol. 53 (4), s. 799–804.
- Houghton D., Jones T. W., Cassidy S., Siervo M., Mac Gowan G. A., Trenell M. J., Jakovljevic D. G., 2015, *The effect of age on the relationship between cardiac and vascular*, „Mechanisms of Ageing and Development”, Vol. 153, s. 1–6.
- Jackson A. S., Janssen J., Sui X., Church T. S., Blair S. N., 2012, *Longitudinal changes in body composition associated with healthy ageing: men, aged 20–96 years*, „British Journal of Nutrition”, Vol. 107 (7), s. 1085–1091.
- Jackson A. S., Sui X., Hebert J. R., Church T. S., Blair S. N., 2009, *Role of life style and aging on the longitudinal change in cardiorespiratory fitness*, „Archives of Internal Medicine”, Vol. 169 (19), s. 1781–1787.
- Jaskólski A., Jaskólska A., 2006, *Podstawy fizjologii wysiłku fizycznego*, AWF, Wrocław.
- Kaess B. M., Rong J., Larson M. G., Hamburg N. M., Vita J. A., Levy D., Benjamin E. J., Vasan R. S., Mitchell G. F., 2012, *Aortic stiffness, blood pressure progression and incident hypertension*, „Journal of the American Medical Association”, Vol. 308 (9), s. 875–881.
- Keleman G. R., 1977, *Applied cardiovascular physiology*, Butterworths, London–Boston–Sydney.
- Kenney W. L., 1997, *Thermoregulation at rest and during exercise in healthy older adults*, „Exercise and Sport Sciences Reviews”, Vol. 25 (1), s. 41–76.
- Kenney W. L., Munce Th. A., 2003, *Invited review: Aging and human temperature regulation*, „Journal of Applied Physiology”, Vol. 95 (6), s. 2598–2603.
- Kenney W. L., Wilmore J. H., Costill D. L., 2015, *Physiology of sport and exercise*, Human Kinetics, Champaign.
- Kitzman D. W., 2001, *Why is diastolic heart failure in older patients the cardiologist's enigma?*, „Dialogues in Cardiovascular Medicine”, Vol. 6 (2), s. 94–103.
- Klabunde R. E., 2011, *Cardiovascular physiology concepts*, Lippincott Williams and Wilkins, Philadelphia.
- Kohara K., Tabara Y., Oshiumi A., Niyawaki Y., Kobayashi T., Miki T., 2005, *Radial augmentation index: a useful and easily obtainable parameter for aging*, „American Journal of Hypertension”, Vol. 18 (1 Pt 2), s. 11S–14S.
- Kowald A., 2009, *Mathematical modeling of the aging process*, [w:] *Handbook of Research on Systems. Biology Applications in Medicine*, Medical Information Science Reference, New York, s. 149–160.
- Kozłowski S., Nazar K., 1999, *Wprowadzenie do fizjologii klinicznej*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa.
- Kwon Y. H., Jang S. H., Yeo S. S., 2014, *Age-related changes of lateral ventricular width and periventricular white matter in the human brain: a diffusion tensor imaging study*, „Neural Regeneration Research”, Vol. 9 (9), s. 986–989.
- Lakatta E. G., 2001, *Cardiovascular aging without a clinical diagnosis*, „Dialogues in Cardiovascular Medicine”, Vol. 6 (2), s. 66–91.
- Lakatta E. G., 2002, *Age-associated cardiovascular changes in health: impact on cardiovascular disease in older persons*, „Heart Failure Reviews”, Vol. 7 (1), s. 29–49.
- Lakatta E. G., Levy D., 2003, *Special review: clinical cardiology: New frontiers*, „Circulation”, Vol. 107, s. 346–354.
- Laskowska-Szcześniak M., Kozak-Szkopek E., 2013, *Uwarunkowania pomyślnego starzenia*, „Forum Medycyny Rodzinnej”, nr 7 (6), s. 287–294.
- Levy B. J., 2001, *Artery changes with aging: degeneration or adaptation?*, „Dialogues in Cardiovascular Medicine”, Vol. 6 (2), s. 104–111.
- Lindeman R. D., Tobin J., Shock N. W., 1985, *Longitudinal studies on the rate of decline in renal function with age*, „Journal of the American Geriatrics Society”, Vol. 33 (4), s. 278–285.

- Magiera A., Kaczmarczyk K., Wiszomirska J., Mszewska E., 2012, *Wydolność fizyczna kobiet w starszym wieku*, „Postępy Rehabilitacji”, nr 2, s. 29–36.
- Manini T. M., 2010, *Energy expenditure and aging*, „Ageing Research Reviews”, Vol. 9 (1), s. 1–9.
- Mann D. L., Zipes D. P., Libby P., Bonow R. O., 2015, *Braunwald's heart disease: a textbook of cardiovascular medicine*, Elsevier Saunders, Philadelphia.
- Marchewka A., Dąbrowski Z., Żołądź J. A., 2013, *Fizjologia starzenia się*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Mizera K., Pilis W., 2010, *Zdrowie oraz fizjologiczne podstawy starości i fizycznego treningu rekreacyjnego*, „Prace Naukowe Akademii im. Jana Długosza w Częstochowie”, Vol. 9, s. 183–203.
- Novoseltsev V. N., Mikhalskii A. I., 2011, *Mathematical modeling and aging: Research program*, „Advances in Gerontology”, Vol. 1 (1), s. 95–106.
- Ogonowska-Słodownik A., Kosmul A., Morgulec-Adamowicz N., 2016, *Aktywność fizyczna, skład ciała i sprawność funkcjonalna kobiet powyżej 60 roku życia uczestniczących w zorganizowanej aktywności fizycznej*, „Gerontologia Polska”, nr 2 (24), s. 102–108.
- Ogawa T., Spina R. J., Martin W. H., Kohrt W. M., Schechtman K. B., Holloszy J. O., Ehsani A. A., 1992, *Effects of aging, sex, and physical training on cardiovascular responses to exercise*, „Circulation”, Vol. 86 (2), s. 494–503.
- Olivetti G., Giordano G., Carradi D., Melissari M., Lagrasta C., Gamber S. R., Anversa P., 1995, *Gender differences and aging: effects on the human heart*, „Journal of the American College of Cardiology”, Vol. 26 (4), s. 1068–1079.
- Ottesen J. T., Olufsen M. S., Larsen J. K., 2006, *Applied mathematical models in human physiology*, Reskilde University, Denmark, Copenhagen.
- Pandolf K. B., 1991, *Aging and heat tolerance at rest or during work*, „Experimental Aging Research”, Vol. 17 (3), s. 189–204.
- Plowman S. A., Smith D. L., 2014, *Exercise physiology*, Lippincott Williams and Wilkins, Philadelphia.
- Pollock R. D., Carter S., Velloso C. P., Duggal N. A., Lorel J. M., Lazarus N. R., Harridge S. D. R., 2015, *An investigation into the relationship between age and physiological function in highly active older adults*, „Journal of Physiology”, Vol. 593 (3), s. 657–680.
- Powers S. K., Howley E. T., 2009, *Exercise physiology*, Mac Graw-Hill, Boston.
- Proctor D. N., Beck K. C., Shen P. H., Eickhoff T. J., Halliwell J. R., Joyner M. J., 1998, *Influence of age and gender on cardiac output – \dot{V}_{O_2} relationships during submaximal cycle ergometry*, „Journal of Applied Physiology”, Vol. 84 (2), s. 599–605.
- Raff H., Levitzky M., 2011, *Medical physiology: a systems approach*, Mc Graw-Hill, New York.
- Ritter A. B., Reisman S., Michniak B. B., 2005, *Biomedical engineering principles*, CRC Press Taylor and Francis Group, New Jersey.
- Robinson S., Koper D. B., Tzankoff S. P., Wagner J. A., Robinson R. D., 1975, *Longitudinal studies of aging in 37 men*, „Journal of Applied Physiology”, Vol. 38 (2), s. 263–267.
- Rogasta M., 2008, *Textbook of clinical hemodynamics*, Elsevier Saunders, Philadelphia.
- Rosen M. J., Sorkin J. D., Goldberg A. P., Hegberg J. M., Katzel L. I., 1998, *Predictors of age-associated decline in maximal aerobic capacity: a comparison of four statistical models*, „Journal of Applied Physiology”, Vol. 84 (6), s. 2163–2170.
- Saltin B., Calbet J. A., 2006, *Point: in health and in a normoxic environment $\dot{V}_{O_{2max}}$ is limited primarily by cardiac output and locomotor muscle blood flow*, „Journal of Applied Physiology”, Vol. 100 (2), s. 744–745.
- Sessions A., Engler A. J., 2016, *Mechanical regulation of cardiac aging in model systems*, „Circulation Research”, Vol. 118 (10), s. 1553–1562.
- Shephard R. J., 1998, *Aging and exercise*, [w:] *Encyclopedia of Sports Medicine and Science*, Internet Society for Sport Science, Toronto.
- Sieck G. C., 2003, *Physiology of aging*, „Journal of Applied Physiology”, Vol. 95 (4), s. 1333–1334.
- Sharma G., Goodwin J., 2006, *Effect of aging on respiratory system physiology and immunology*, „Clinical Interventions in Aging”, Vol. 1 (3), s. 253–260.

- Sorkin J. D., Muller D. C., Andres R., 1999, *Longitudinal change in the heights of men and women: consequential effects on body mass index*, „Epidemiologic Reviews”, Vol. 21 (2), s. 247–260.
- Stathokostas L., Jacob-Johnson S., Petrella R. J., Paterson D. H., 1985, *Longitudinal changes in aerobic power in older men and women*, „Journal of Applied Physiology”, Vol. 97 (2), s. 781–789.
- Strait J. B., Lakatt E. G., 2012, *Aging-associated cardiovascular changes and their relationship to heart failure*, „Heart Failure Clinics”, Vol. 8 (1), s. 143–164.
- Stratton J. R., Levy W. C., Cerqueira M. D., Schwartz R. S., Abrass J. B., 1994, *Cardiovascular responses to exercise effects of aging and exercise training in healthy men*, „Circulation”, Vol. 89, s. 1648–1655.
- Szubert J., 1981, *Modelowanie i symulacja komputerowa badań we współczesnej biologii i medycynie*, „Polski Tygodnik Lekarski”, nr 25 (36), s. 943–946.
- Szubert J., Szubert S., 2015, *Innowacyjna, kompleksowa, ilościowa ocena parametrów fizjologicznych kobiet i mężczyzn podczas wysiłku fizycznego w funkcji temperatury wewnętrznej i powierzchni ciała*, „Złota Księga Prix Galien Polska”.
- Tanaka H., Monahan K. D., Seals D. R., 2001, *Age-predicted Maxima heart rate revisited*, „Journal of the American College of Cardiology”, Vol. 37 (1), s. 153–156.
- Tarasova O. S., Borovik A. S., Kuzmetrov S. Y., Popov D. V., Orlov O. J., Vinogradova O. L., 2013, *The pattern of changes in physiological parameters in the course of changes in physical exercise intensity*, „Human Physiology”, Vol. 39 (2), s. 171–177.
- Taylor A. W., Johnson M. J., 2008, *Physiology of exercise and healthy aging*, Human Kinetics, Champaign–New York.
- Tipton C. M., Franklin B. A., 2006, *The language of exercise*, [w:] C. M. Tipton (ed.), *ACSM'S Advanced Exercise Physiology*, Lippincott Williams and Wilkins, Philadelphia.
- Ueno S., Ikeda K., Tal T., 2014, *Metabolic rate prediction in young and old men by heart rate, ambient temperature, weight and body fat percentage*, „Journal of Occupational Health”, Vol. 56 (6), s. 519–525.
- Vogelaere P., Pereira C., 2005, *Thermoregulation and aging*, „Revista Portuguesa de Cardiologia”, Vol. 24 (5), s. 747–761.
- Westerterp K. P., Meijer E. P., 2001, *Physical activity and parameters of aging: a physiological perspective*, „Journals of Gerontology. Series A: Biological Sciences and Medical Sciences”, Vol. 56 (2), s. 7–12.
- WHO, 2012, *The European health report*.
- Wieczorkowska-Tobis K., 2008, *Zmiany narządowe w procesie starzenia*, „Polskie Archiwum Medycyny Wewnętrznej. Suplement”, nr 118, s. 63–68.
- Żołądź J. A., Majerczak J., 2011, *Wpływ starzenia się na wydolność fizyczną człowieka*, [w:] J. Marchewka, J. A. Żołądź, Z. Dąbrowski (red.), *Fizjologiczne procesy starzenia*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.