

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

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

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

Opracowane metody pozwalają każdy maksymalny parametr fizjologiczny serca dla dużej i przeciętnej wydolności mężczyzn przedstawić: graficznie (za pomocą wykresu), analitycznie (za pomocą równania matematycznego) oraz tabelarycznie. Takie opracowanie maksymalnych parametrów fizjologicznych serca mężczyzn 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 mężczyzn.

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

**Summary.** During the transition from youth to old age the maximum physiological parameters of men'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 for determining the

---

\* 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

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 men: 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 men 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 hearts of men.

## Wstęp

Człowiek zaczyna się starzeć mniej więcej od 25 roku życia. Proces starzenia się powoduje zmiany struktur i funkcji. Zmiany starcze nawarstwiają się nieuchronnie w organizmie człowieka, a starzenie postępuje stopniowo, często skrycie i specyficznie (endogennie), mają różne nasilenie i jakość. Z powodu różnic w dynamice procesu starzenia się często wiek kalendarzowy (chronologiczny) nie pokrywa się z wiekiem biologicznym (czynnościowym). Z osobniczego punktu widzenia, starzenie może być lepsze lub gorsze (Conn, 2006; Correia i in., 2002; Fleg i in., 1995; Guyton, Hall, 2005; Houghton i in., 2015; Jackson i in., 2012; Kenney i in., 2015; Kozłowski, Nazar, 1999; Pollock i in., 2015).

Wyróżnia się trzy typy starzenia się (Laskowska-Szcześniak, Kozak-Szkopek, 2013; Marchewka i in., 2013; Plowman, Smith, 2014; Sieck, 2003; Taylor, Johnson, 2008; Żołądz, Majerczak, 2011):

1. Zdrowy. Osoby starzejące się w ten sposób są pogodne i zadowolone z życia, postrzegają się jako młodsze, nie stronią od kontaktów z młodym pokoleniem, są bez ograniczeń funkcji, sprawne umysłowo, optymistycznie nastawione do ludzi i aktywnie uczestniczą w życiu otoczenia. Nie chorują przewlekłe.

2. Zwykły. Taki typ starzenia jest powszechny. Występują dyskretne działania czynników patologicznych, czyli brak „otwartej” patologii; przeciwdziała jej istnienie znacznych rezerw funkcjonalnych, przede wszystkim w układzie oddechowym i sercowo-naczyniowym.

3. Chorobowy. Ten typ starzenia charakteryzuje się widocznym udziałem chorób.

Autorzy niniejszego opracowania brali pod uwagę osoby należące do pierwszego i drugiego typu starzenia się, tj. zdrowego i zwykłego.

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; Żołądz, 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.

Zmiany zachodzące w organizmie człowieka z upływem czasu są przejawem starzenia się. Ich wyrazem jest zmniejszenie się sprawności czynnościowej tkanek, narządów i mechanizmów regulacyjnych oraz spadek sprawności adaptacyjnej organizmu. Przejawem pogorszenia się sprawności czynnościowej może być zmniejszanie się parametrów fizjologicznych, charakteryzujących różne czynności organizmu, np.: maksymalnego minutowego poboru tlenu (pułapu tlenowego,  $Vo_{2max}$ ), częstotliwości pracy serca, objętości wyrzutowej serca, wentylacji minutowej płuc (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).

Przyjmuje się, że na okres między 25. a 30. rokiem życia przypada maksymalna sprawność czynnościowa i adaptacyjna organizmu człowieka. Wartość parametrów fizjologicznych ustroju po 30. roku życia zmniejsza się i późniejsze lata życia można zaliczyć do okresu stopniowego zmniejszania się sprawności organizmu (Cheitlin, 2003; Fleg i in., 1995; Górski, 2008; Kenney i in., 2015; Kozłowski, Nazar, 1999; Mann i in., 2015; Plowman, Smith, 2014; Saltin, Calbet, 2006).

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 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 określonym 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 dwa tory starzenia się: (1) zdrowego i (2) zwykłego. Aby dokonać analizy maksymalnych parametrów fizjologicznych serca mężczyzn przy przejściu od młodości do wieku starszego,

autorzy pracy korzystali z danych z różnych źródeł, polskich i zagranicznych (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).

Widoczne różnice, zarówno w budowie anatomicznej, jak i w zachodzących procesach fizjologicznych kobiet i mężczyzn, odgrywają zasadniczą rolę w podejmowanych wysiłkach fizycznych. Kobiety, w przeciwieństwie do mężczyzn, są z reguły lżejsze i niższe o około 13 cm. Wartość całkowitej przemiany materii (CPM) i podstawowa przemiana materii (PPM) są niższe u kobiet, niż u mężczyzn. Biorąc pod uwagę parametry oddziałujące na wartość  $Vo_{2max}$ , m.in. masę ciała, zawartość hemoglobiny we krwi, ilość włókien mięśniowych, u kobiet zdolność poboru tlenu jest na niższym poziomie (33–42 mL/min/kg m.c.) niż u mężczyzn (43–52 mL/min/kg m.c.) (Kaess i in., 2012; Kenney i in., 2015; Kozłowski, Nazar, 1999; Magiera i in., 2012; Ogonowska-Słodownik i in., 2016; Plowman, Smith, 2014).

Kobiety, ze względu na drobniejszą budowę ciała, mają z reguły niższą niż mężczyźni masę serca (około 250 g) oraz jego objętość (około 550 mL). Przyczyną zwiększonej częstotliwości skurczów serca u kobiet jest mniejsza objętość wyrzutowa serca oraz pojemność minutowa, której maksymalna wartość to 25 L/min (Kaess i in., 2012; Kenney i in., 2015; Kozłowski, Nazar, 1999; Magiera i in., 2012; Ogawa i in., 1992; Olivetti i in., 1995).

Wszystko to powoduje, że oddzielnie są rozpatrywane maksymalne parametry fizjologiczne kobiet i mężczyzn.

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

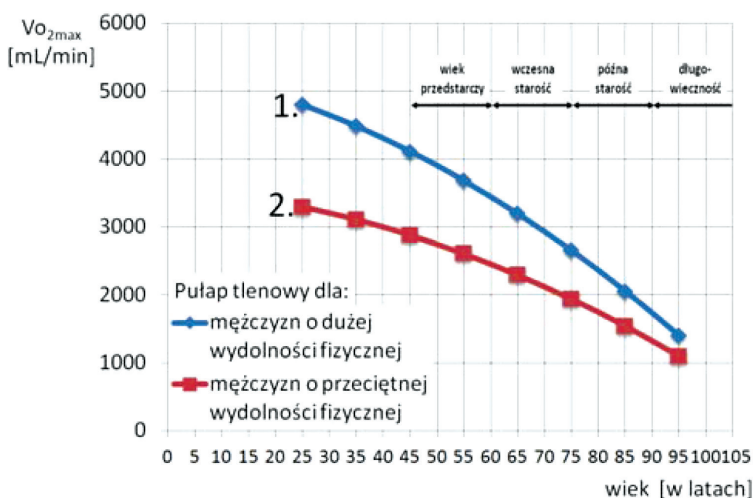
## **Material i metody**

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) bądź 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 dwa typy starzenia się: (1) typ zdrowego starzenia się, (2) typ zwykłego

starzenia się. Aby wyznaczyć maksymalne parametry fizjologiczne serca mężczyzn: maksymalny minutowy pobór tlenu ( $V_{o2max}$ ), 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 mężczyzn 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 mężczyzn (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 mężczyzn – $Vo_{2max}$



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

**Źródło:** wyniki badań własnych.

Równania opisujące zmiany  $V_{O_{2max}}$  u mężczyzn o dużej (1.) i przeciętnej (2.) wydolności fizycznej w funkcji wieku:

$$1. Vo_{2max} = -0,28571W^2 - 14,2857W + 5335,714 \text{ [mL/min]},$$

$$2. Vo_{2max} = -0,21429W^2 - 5,71429W + 3576,786 \text{ [mL/min]},$$

gdzie:

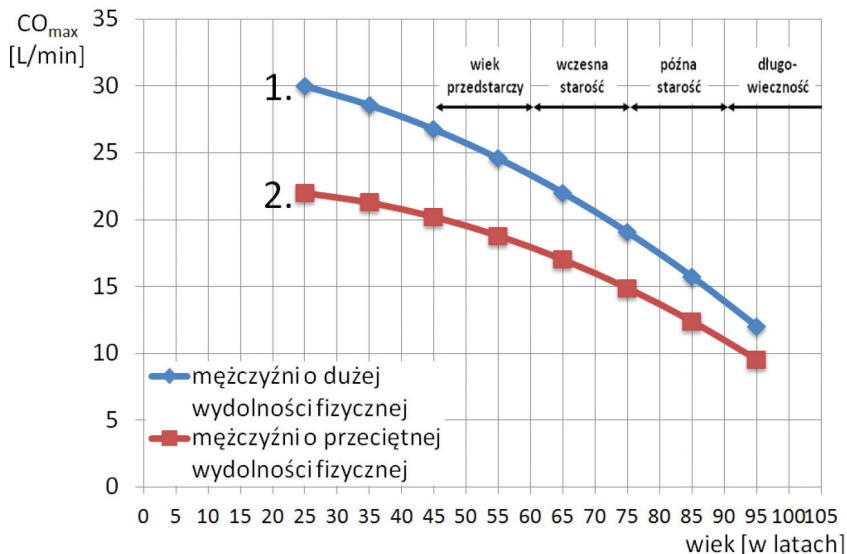
W – wiek w latach.

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

Wiek [w latach]	25	35	45	55	65	75	85	95
Mężczyźni o dużej wydolności fizycznej [mL/min] i w [%]	4800 100	4486 93,5	4114 85,7	3686 76,8	3200 66,7	2657 55,4	2057 42,9	1400 29,2
Mężczyźni o przeciętnej wydolności fizycznej [mL/min] i w [%]	3300 100	3114 94,4	2886 87,4	2614 79,2	2300 69,7	1943 58,9	1543 46,8	1100 33,3

**Źródło:** wyniki badań własnych.

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



**Ryc. 2.** Zmiany  $CO_{max}$  u mężczyzn 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 mężczyzn o dużej (1.) i przeciętnej (2.) wydolności fizycznej w funkcji wieku:

$$1. CO_{\max} = -0,001905W^2 - 0,02857W + 31,90476 \text{ [L/min]},$$

$$2. CO_{\max} = -0,001786W^2 + 0,035714W + 22,22321 \text{ [L/min]},$$

gdzie:

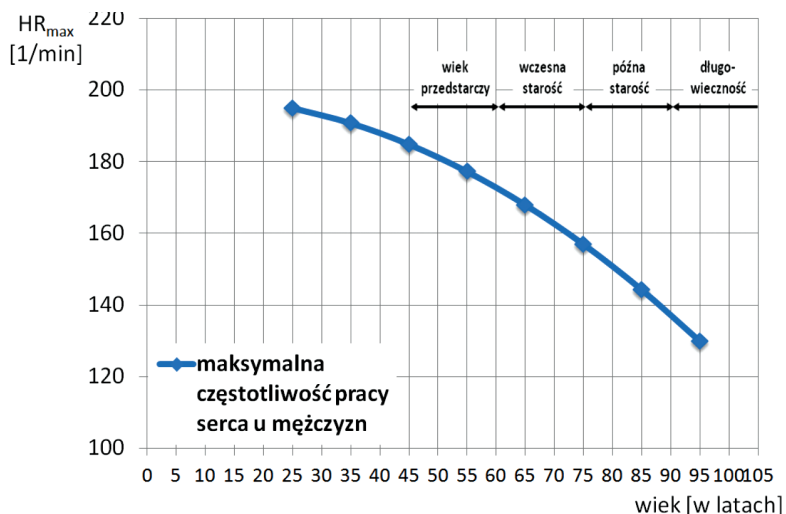
W – wiek w latach.

**Tabela 2.** Wartości  $CO_{\max}$  dla mężczyzn o dużej i przeciętnej wydolności fizycznej dla określonego wieku

Wiek [w latach]	25	35	45	55	65	75	85	95
Maksymalny rzut minutowy dla mężczyzn o dużej wydolności fizycznej [l/min] i w [%]	30,0 100	28,6 95,2	26,8 89,2	24,6 81,9	22,0 73,3	19,0 63,5	15,7 52,4	12,0 40,0
Maksymalny rzut minutowy dla mężczyzn o przeciętnej wydolności fizycznej [l/min] i w [%]	22,0 100	21,3 96,8	20,2 91,9	18,8 85,4	17,0 77,3	14,9 67,5	12,4 56,2	9,5 43,2

**Źródło:** wyniki badań własnych.

### 3. Maksymalna częstość skurczów serca u mężczyzn – $HR_{\max}$



**Ryc. 3.** Zmiany  $HR_{\max}$  u mężczyzn 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 mężczyzn o dużej i przeciętnej wydolności fizycznej w funkcji wieku:

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

gdzie:

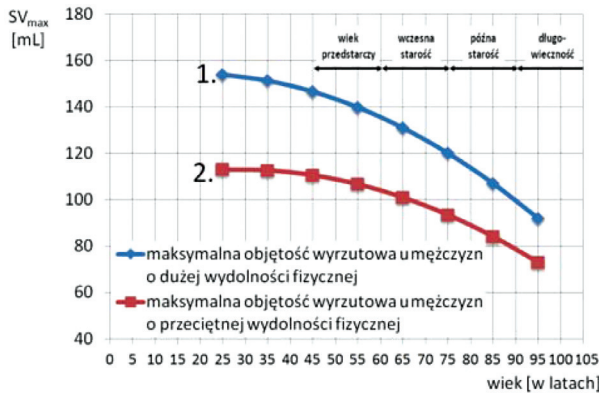
W – wiek w latach.

**Tabela 3.** Wartość  $HR_{max}$  dla mężczyzn 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 mężczyzn [l/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 mężczyzn – $SV_{max}$



**Ryc. 4.** Zmiany  $SV_{max}$  u mężczyzn 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 mężczyzn o dużej i przeciętnej wydolności fizycznej w funkcji wieku:

$$1. SV_{max} = \frac{CO_{max}}{HR_{max}} = \frac{-0,001905W^2 - 0,02857W + 31,90476}{-0,00845W^2 + 0,085714W + 198,1399} \text{ [mL]},$$

$$2. SV_{max} = \frac{CO_{max}}{HR_{max}} = \frac{-0,001786W^2 + 0,035714W + 22,22321}{-0,00845W^2 + 0,085714W + 198,1399} \text{ [mL]},$$

gdzie:

W – wiek w latach.

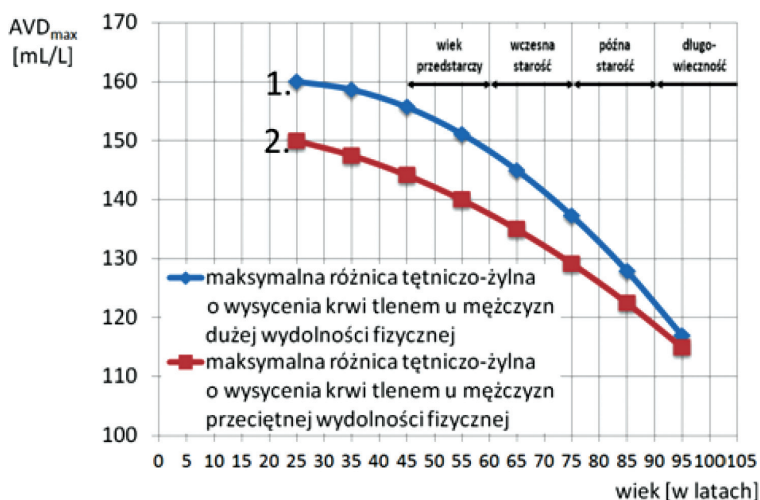


**Tabela 4.** Wartości  $SV_{max}$  dla mężczyzn o dużej i przeciętnej wydolności fizycznej dla określonego wieku

Wiek [w latach]	25	35	45	55	65	75	85	95
$SV_{max}$ – dla mężczyzn o dużej wydolności fizycznej [mL] i w [%]	154,0 100	151,4 98,3	146,6 95,2	139,9 90,8	131,0 85,1	120,1 78,0	107,1 69,5	92,0 59,7
$SV_{max}$ – dla mężczyzn o przeciętnej wydolności fizycznej [mL] i w [%]	113,0 100	112,7 99,7	110,6 97,9	106,7 94,4	101,0 89,4	93,5 82,7	84,1 74,5	73,0 64,6

**Źródło:** wyniki badań własnych.

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



**Ryc. 5.** Zmiany  $AVD_{max}$  dla mężczyzn 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 mężczyzn o dużej i przeciętnej wydolności fizycznej w funkcji wieku:

$$1. AVD_{max} = \frac{Vo_2max}{CO_{max}} = \frac{-0,28571W^2 - 14,2857W + 5335,714}{-0,001905W^2 - 0,02857W + 31,90476} \text{ [mL/L]},$$

$$2. AVD_{max} = \frac{Vo_2max}{CO_{max}} = \frac{-0,21429W^2 - 5,71429W + 3576,786}{-0,001786W^2 + 0,035714W + 22,22321} \text{ [mL/L]},$$

gdzie:

W – wiek w latach.

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

Wiek [w latach]	25	35	45	55	65	75	85	95
$AVD_{max}$ dla mężczyzn o dużej wydolności fizycznej [mL/L] i w [%]	160,0 100	158,6 99,2	155,7 97,3	151,1 94,5	145,0 90,6	137,3 85,8	127,9 80,0	117,0 73,1
$AVD_{max}$ dla mężczyzn o przeciętnej wydolności fizycznej [mL/L] i w [%]	150,0 100	147,5 98,3	144,2 96,1	140,0 93,3	135,0 90,0	129,2 86,1	122,5 81,7	115,0 76,7

Źródło: wyniki badań własnych.

## Omówienie

Na ryc. 1 przedstawiono zmiany  $Vo_{2max}$  u mężczyzn o dużej i przeciętnej wydolności fizycznej przy przejściu od młodości do wieku starszego, zaznaczając liczbami wykresy: 1. dla osób o 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 mężczyzn 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 mężczyzn 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 mężczyzn 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 przedstawione 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 uwiadcniają wykresy i ujęcia tabelaryczne oraz potwierdzają liczni autorzy (Era, Rantanen, 1997; Fox, 2008; Guyton, Hall, 2005; Kenney i in., 2015).

Maksymalne pobieranie tlenu przez organizm (pułap tlenowy,  $Vo_{2max}$ ), traktowane jako wykładnik ogólnej wydolności fizycznej człowieka, zmniejsza się

z wiekiem, poczynając od 25 roku życia (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; Żołędź, Majerczak, 2011). Regresja maksymalnego pobierania tlenu przez organizm, w zależności od wieku, przebiega krzywoliniowo, a nie prostoliniowo jak twierdzi duża część badaczy (Dehn, Bruce, 1972; Górski, 2008; Kozłowski, Nazar, 1999; Marchewka i in., 2013; Plowman, Smith, 2014; Saltin, Calbet, 2006). Krzywe te dla mężczyzn i kobiet przebiegają prawie równolegle, choć na różnym poziomie wartości. W każdym wieku przeciętne  $Vo_{2max}$  jest większe u mężczyzn niż u kobiet (Guyton, Hall, 2005; Kaess i in., 2012; Kenney i in., 2015; Ogonowska-Słodownik i in., 2016; Plowman, Smith, 2014; Proctor i in., 1998). Zmniejszanie się wydolności fizycznej ( $Vo_{2max}$ ) z wiekiem traktowane jest jako wskaźnik starzenia się organizmu człowieka (Dogra i in., 2012; Guyton, Hall, 2005; Houghton i in., 2015; Kenney i in., 2015; Kozłowski, Nazar, 1999; Marchewka i in., 2013; Plowman, Smith, 2014). Proces zmniejszania się wydolności fizycznej z wiekiem zachodzi tak u osób o dużej aktywności ruchowej, jak i u osób sedentarnych. W każdym natomiast wieku wydolność fizyczna człowieka może być większa od przeciętnej, zależnie od trybu życia. Człowiek w wieku 60–70 lat, prowadzący aktywny ruchowo tryb życia, może posiadać większą wydolność fizyczną niż człowiek, np. w wieku 30 lat, prowadzący siedzący tryb życia, otyły i palący (Gille, 2010; Guyton, Hall, 2005; Jackson i in., 2009; Kenney i in., 2015; Kozłowski, Nazar, 1999; Marchewka i in., 2013; Mizera, Pilis, 2010; Plowman, Smith, 2014).

Ludzi uprawiających sport cechuje w każdym okresie życia większa wydolność fizyczna, niż ludzi o małej aktywności ruchowej. Jednak w obu tych grupach prędkość zmniejszania się  $Vo_{2max}$  jest podobna, chociaż różny jest poziom, na jakim przebiegają krzywe wyrażające  $Vo_{2max}$  w funkcji wieku (Guyton, Hall, 2005; Hossack, Bruce, 1982; Jaskólski, Jaskólska, 2006; Kenney i in., 2015; Kozłowski, Nazar, 1999; Plowman, Smith, 2014).

Zmniejszanie się  $Vo_{2max}$  wraz z wiekiem uwarunkowane jest zmniejszaniem sprawności funkcji zaopatrzenia tlenowego, przede wszystkim redukcji maksymalnej objętości minutowej serca ( $CO_{max}$ ) na skutek zmniejszania maksymalnej częstości skurczów serca ( $HR_{max}$ ) i jego maksymalnej objętości wyrzutowej ( $SV_{max}$ ) (Brandfonbrener i in., 1995; Fleg i in., 1995; Gault i in., 2013; Houghton i in., 2015; Kenney i in., 2015; Kozłowski, Nazar, 1999; Plowman, Smith, 2014; Proctor i in., 1998; Raff, Levitzky, 2011; Stephad, 1998):

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

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.

Zmniejszenie zdolności do wykonywania wysiłku fizycznego z wiekiem charakteryzuje się zmniejszeniem 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 nie trenującymi (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).

Wraz z wiekiem zmniejsza się maksymalna częstość skurczów serca ( $HR_{max}$ ), maksymalna objętość wyrzutowa serca ( $SV_{max}$ ) i pojemność minutowa serca ( $CO_{max}$ ). Osiąganie mniejszej pojemności minutowej ( $CO_{max}$ ) u ludzi starszych podczas maksymalnych wysiłków fizycznych jest wynikiem zarówno osiągnięcia mniejszej częstości skurczów serca, jak i mniejszej objętości wyrzutowej serca (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):

$$CO = SV \cdot HR.$$

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 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 ( $HR_{max}$ ) jest wartością dość stałą dla ludzi w tym samym wieku. U ludzi mających 20–22 lata maksymalna częstość skurczów serca wynosi około 200/min. Maksymalna częstość skurczów serca zmniejsza się z wiekiem w sposób krzywoliniowy. U dziesięcioletnich dzieci wynosi około 210/min, a u sześćdziesięcioletnich ludzi – już tylko około 160/min. Układ bódźcoprzewodzący serca ulega postępującym zmianom w miarę starzenia się (Hossack, Bruce, 1982; Jaskólski, Jaskólska, 2006; Kenney i in., 2015; Kozłowski, Nazar, 1999; Marchewka i in., 2013; Robinson i in., 1975; Szubert, Szubert, 2015; Tanaka i in., 2001; Ueno i in., 2014).

Liczba komórek rozrusznikowych węzła zatokowego ulega zmniejszeniu, struktura węzła przedsionkowo-komorowego oraz pozostałe elementy układu przewodzącego ulegają zwłóknieniu. Zmiany te sprzyjają zaburzeniom przewodnictwa, typowym dla podeszłego wieku. Ponadto w wyniku zmniejszenia odpowiedzi na stymulację  $\beta$ -adrenergiczną dochodzi do zmniejszenia maksymalnej częstości rytmu serca i kurczliwości podczas wysiłku, co prowadzi do zmniejszonej tolerancji wysiłku u starszych osób (Guyton, Hall, 2005; Hossack, Bruce, 1982; Houghton i in., 2015; Jaskólski, Jaskólska, 2006; Kenney i in., 2015; Kozłowski, Nazar, 1999; Plowman, Smith, 2014).

Zmniejszanie się podczas wysiłków fizycznych objętości wyrzutowej serca w miarę starzenia się organizmu przypisuje się, przede wszystkim, zmniejszeniu się podatności ścian komór i wyższemu podczas wysiłków ciśnieniu tętniczemu. Jest to przyczyną zwiększonego oporu dla odpływu krwi z serca (Dill i in., 1958; Gault i in., 2013; Houghton i in., 2015; Kaess i in., 2012; Kitzman, 2001; Kozłowski, Nazar, 1999; Lakatta, Levy, 2003). Wyższe u ludzi starszych podczas wysiłków ciśnienie krwi w komorach jest wynikiem zmniejszenia podatności ich ścian, a większe wzrosty ciśnienia tętniczego są wynikiem zmniejszenia podatności ścian tętnic. U podłoża tych zmian leżą procesy starzenia się ścian naczyń wieńcowych serca (Guyton, Hall, 2005; Houghton i in., 2015; Kaess i in., 2012; Kitzman, 2001; Lakatta, 2002).

Zmniejszenie maksymalnej objętości wyrzutowej oraz maksymalnej częstości skurczów serca wraz z wiekiem powoduje zmniejszenie maksymalnej pojemności minutowej serca, a ta, jak wiadomo, skutkuje zmniejszeniem 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):

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

Różnica tętniczno-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 mężczyzny, w przekroju poprzecznym, musi być spełnione równanie:

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

tzn. 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, tzn. lewa strona równania nie byłaby równa jego prawej stronie.

## Wnioski

1. Maksymalne parametry fizjologiczne serca u mężczyzn, przy przejściu od młodości do wieku starszego, należy rozpatrywać, uwzględniając wydolność fizyczną. Dlatego w przeprowadzonych badaniach wymienione parametry rozpatrywano dla mężczyzn 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 mężczyzny 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 mężczyzny, 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 rzeczywiście 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., Zieman 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., Fieldind 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: comperision 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.
- Kelleman 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 pomysłnego 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., Gambert 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*, Saunders Elsevier, 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.