

Olga SKIBA, Koło Naukowe Biomechaniki przy Katedrze Mechaniki Stosowanej Politechniki Śląskiej

Jacek JURKOJC, Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Śląska

OCENA WPLYWU CZASU TRWANIA ĆWICZEŃ NA WARTOŚĆ SIŁ MIĘŚNIOWYCH W OBRĘBIE STAWU KOLANOWEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono przebieg zmęczenia mięśni prostowników stawu kolanowego w trakcie wykonywania ćwiczeń. Zmęczenie to zostało określone podczas wykonywania pracy beztlenowej. Zamieszczono wykresy obrazujące przebieg tych zmian. Opisano również stanowisko pomiarowe wykorzystane do badań oraz pracę beztlenową mięśni.

1. WSTĘP

W trakcie wykonywania ćwiczeń fizycznych, obserwuje się różny przebieg zmęczenia u osób ćwiczących. Część osób jest w stanie ćwiczyć przez długi okres czasu, natomiast niektórzy mają problem z wykonaniem kilku ćwiczeń. Podczas badań podjęto próbę określenia, jaki jest przebieg zmęczenia mięśni. W doświadczeniu wzięły udział 3 osoby, które wykonywały ćwiczenia polegające na jeździe na ergonometrze oraz utrzymywaniu pozycji w półprzysiadzie. Ćwiczenia te odbywały się w różnym tempie i w różnych odcinkach czasu. Jako wynik badań otrzymano przebieg zmiany siły mięśni prostowników stawu kolanowego po kolejnych seriach ćwiczeń.

2. URZĄDZENIE WYKORZYSTANE DO BADAŃ.

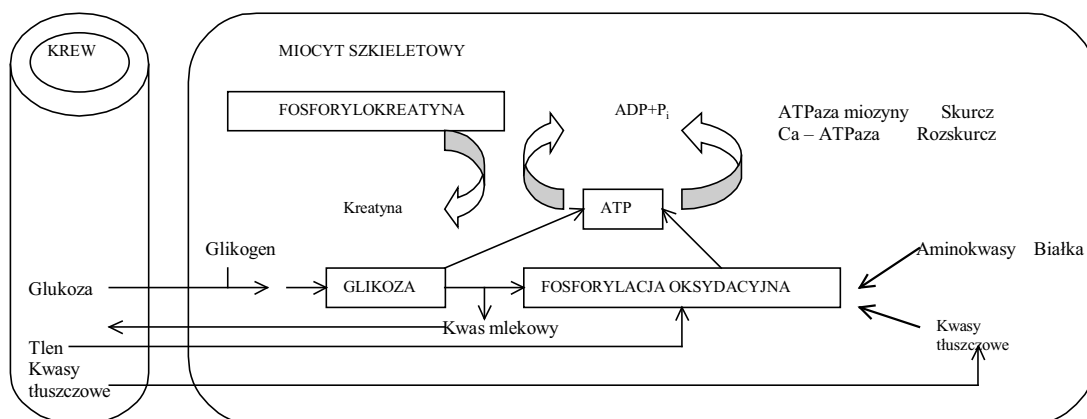
Fotele do ćwiczeń wykorzystywane są do diagnostyki stawów kończyn i mięśni okołostawowych oraz rehabilitacji pourazowej stawów. Dają one możliwość profesjonalnej rehabilitacji pacjentów po przebytych zabiegach operacyjnych w obrębie stawów kończyn oraz po różnego typu urazach układu szkieletowo – mięśniowego kończyn.

Urządzenie pomiarowe jest urządzeniem zewnętrznym z oprogramowaniem pracującym w środowisku Windows, współpracującym z arkuszem kalkulacyjnym Excel. Umożliwia diagnostykę stawów i mięśni kończyn, programowanie oraz kontrolę przebiegu cyklu rehabilitacyjnego. Może być wykorzystywane w procesie rehabilitacji pourazowej oraz do monitorowania treningu sportowców. Moduł diagnostyczny umożliwia obiektywny pomiar momentu sił mięśniowych pacjenta oraz rzeczywisty pomiar zakresu ruchomości w stawie, pozwalając na kontrolę efektów rehabilitacji. W sposób bezstronny i obiektywny można stwierdzić, czy siła mięśni pacjenta wzrasta. Zapewnia również pełną dokumentację efektów rehabilitacji. Równocześnie istnieje możliwość określenia momentów sił mięśniowych przy skurczu izometrycznym, dynamiki tego skurczu oraz wytrzymałości mięśni. Dzięki urządzeniu można stwierdzić, czy proces treningowy jest właściwy i czy następuje wzrost momentów sił mięśniowych. Moduł rehabilitacyjny umożliwia wykonywanie ćwiczeń izometrycznych z określoną przez rehabilitanta siłą skurczu, czasem skurczu, czasem relaksacji oraz czasem trwania ćwiczenia. Nie ma groźby przeciążenia pacjenta, gdyż używa siły określonej przez rehabilitanta i na bieżąco widać czy następuje zmęczenie.

Istnieje również możliwość narzucenia pacjentowi zakresu kąta przy ćwiczeniu, czasu wykonywania ruchu w ustalonym zakresie kątowym oraz czasu ćwiczenia.

3. PRACA BEZTLENOWA.

Mięśnie mogą wykonywać pracę tlenową oraz beztlenową. Głównym bezpośrednim źródłem energii dla skurczów jest hydroliza ATP do ADP i fosforanu. Synteza ATP jest ściśle związana z metabolizmem węglowodanów, tłuszczów i białek i zachodzi głównie w przebiegu fosforylacji oksydacyjnej. W mięśniach zawarta jest również fosforylokreatyna, która ulega hydrolizie do kreatyny i grupy fosforanowej z uwolnieniem energii. W czasie spoczynku część ATP powstającego w mitochondriach oddaje grupy fosforanowe kreatynie i wtedy następuje odbudowa zapasów fosforylokreatyny. Natomiast podczas pracy fosforylokreatyna ulega hydrolizie w miejscu łączenia się aktyny z głowami i oddaje grupę fosforanową miozyny zmieniając ADP na ATP. Przy braku tlenu w kurczących się mięśniach glukoza ulega rozkładowi tylko do kwasu pirogronowego, który z kolei zostaje zamieniony na kwas mlekowy [3, 4].



Rys. 1. Źródła produkcji ATP podczas skurczu [3]

Aby człowiek mógł wykonać jakąkolwiek pracę musi posiadać potrzebną do tego energię, która czerpana jest z ATP (adenozynotrójfosforanu). Posiada on tzw. wiązania wysokiej energii pomiędzy cząstkami reszt fosforanowych (wiązania fosforanowe). Rozbicie wysokoenergetycznego wiązania dostarcza energii rzędu ok.10 kcal., która może być użyta dla wykonania pracy mechanicznej, albo jest przekształcana w wiązania chemiczne w przebiegu procesów syntezy. W wyniku rozbicia wiązania wysokiej energii ATP powstaje ADP (adenozynodwufosforan) i wolna reszta fosforanowa. Enzymem, który katalizuje rozbicie wiązania wysokoenergetycznego jest enzym ATP-aza. Zasoby ATP w mięśniach są niewielkie i wystarczałyby zaledwie na parę sekund pracy. Podczas pracy nie dochodzi jednak do całkowitego wyczerpania tego związku dzięki ciągłej regeneracji wiązań wysokoenergetycznych i odbudowy ATP.

Wydolność organizmu zależna jest od sprawności zaopatrzenia w tlen. Mięśnie mają pewną ograniczoną, ale niezwykle ważną zdolność do pracy także w warunkach beztlenowych. Najogólniej rzecz biorąc przebieg zjawisk jest następujący: gdy człowiek zaczyna ćwiczyć, wskutek zwiększonej aktywności mięśni złożony system wewnętrznej informacji zwiększa szybkość pracy serca, przyspiesza oraz pogłębia oddech, by usprawnić

zaopatrzenie organizmu w tlen. Są to procesy automatyczne i mało zależne od woli. Zwiększony pobór tlenu jest niezbędny do odbudowy związków energetycznych zapewniających nieprzerwaną pracę mięśni. Zależność: praca - zwiększony pobór tlenu - i możliwość kontynuowania pracy, jest w praktyce bardzo skomplikowana. Dalszy rozwój procesów energetycznych zależy od tego, z jaką intensywnością ruch jest kontynuowany i jak długo trwa. Można wyróżnić dwie możliwości:

- ćwiczenia z maksymalnym obciążeniem,
- ćwiczenia swobodne, lekkie, z niewielkim obciążeniem.

Podczas ćwiczeń z maksymalnym obciążeniem już po 5-10 minutach osoby niewytrenowane nie są w stanie utrzymać tempa, lub wręcz nie mogą kontynuować ćwiczeń. Tętno osiąga maksymalną wartość, oddech staje się coraz szybszy, a mięśnie nóg odmawiają posłuszeństwa, przed oczyma pojawiają się "mroczki". Często zawodnik po takim wysiłku nie może ustać na nogach i mdleje. Ten stan trwa przez pewien czas, mimo iż mięśnie nie pracują. Scharakteryzowano ogólnie procesy zachodzące podczas takich ćwiczeń. Intensywne skurcze mięśni bardzo szybko wyczerpują nagromadzone w nich związki energetyczne. Mimo zwiększonej intensywności pracy serca i płuc pobierany w znacznie zwiększonej objętości tlen jeszcze nie zdążył dotrzeć do mięśni i przyspieszyć odbudowy niezbędnych związków energetycznych. Nie została jeszcze uruchomiona podwyższona tlenowa przemiana materii. W takiej sytuacji organizm uruchamia beztlenowy system energetyczny. Proces ten jest jednak w stanie zapewnić dużą intensywność pracy mięśnia tylko na krótki okres. Zatem wszelkie rezerwy energetyczne zostają wyczerpane i mięśnie nie są w stanie kontynuować pracy w takim tempie. Jednocześnie wskutek zwiększonej pracy serca i płuc w początkowym etapie intensywnego wysiłku znaczna ilość zaopatrzonej w tlen krwi została wyekspediowana do pracujących mięśni. Słabo wytrenowani zawodnicy po ukończeniu intensywnego cyklu ćwiczeń, nie są w stanie ich kontynuować, bowiem w momencie, gdy mięśnie przestają pracować i ustaje ich pompujący wpływ na transport krwi żyłnej, serce przez pewien czas nie ma prawie czego pompować. Wtedy, wskutek zmniejszonego zaopatrzenia mózgu w tlen, pojawia się okresowe zjawisko zwane zapaścią ortostatyczną (zawodnik upada, a czasem mdleje), które z chwilą przywrócenia równowagi w obiegu krwi i poprawy ukrwienia mózgu mija.

Procesy beztlenowe prowadzą do powstawania kwasu mlekowego, jeżeli nie są one zbyt intensywne, organizm radzi sobie z jego nadmiarem poprzez utlenianie. Jeżeli jednak procesy beztlenowe są tak intensywne, że organizm nie nadąża z utlenianiem kwasu mlekowego, gromadzi się on w organizmie doprowadzając m.in. do ograniczenia zdolności mięśni do skurczów. Biegacze, szczególnie początkujący, znają dobrze skutki "zakwaszenia" objawiające się kilkudniowym bólem mięśni. Dług tlenowy polega na powstaniu niedoboru tlenu niezbędnego do pokrycia energetycznego kosztu wykonanej pracy. Dług zaciągnięty musi być spłacony. Na przykład podczas intensywnych krótkotrwałych ćwiczeń zapotrzebowanie na tlen, wynikające z zachodzących przemian energetycznych, może kilkakrotnie przewyższyć możliwość zaopatrzenia. Zasoby energetyczne są wtedy niemal całkowicie wyczerpane i muszą być szybko odbudowane poprzez procesy tlenowe. Częściowo też uruchomione procesy przemiany beztlenowej spowodowały powstanie pewnych ilości kwasu mlekowego, który też musi być utleniony. Utrzymujące się przez pewien czas po ćwiczeniach intensywne oddychanie i przyspieszona praca serca służą właśnie spłaceniu długu tlenowego. Dodać należy, że spłata tej części długu tlenowego, jaka związana jest z utlenieniem kwasu mlekowego, trwa znacznie dłużej, w zależności od stopnia wytrenowania organizmu. Intensywne ćwiczenia powodują powstanie kwasu mlekowego, który korzystnie działa na serce oraz wiąże toksyczne metale ciężkie, które gromadzą się w ustroju. Osiągnięcie progowej wartości kwasu mlekowego powoduje uczucie zmęczenia i ból mięśni [5].

4. PRZEBIEG BADAŃ

Badania zostały przeprowadzone dla trzech osób w wieku 19, 22 i 24 lata. Osoba pierwsza brała udział w dwóch badaniach związanych z jazdą na ergonometrze, natomiast kolejne dwie osoby wykonywały przysiady. Po każdym ćwiczeniu wykonywano pomiar momentu sił mięśniowych prostownika stawu kolanowego nogi prawej (w jego skład wchodzi: mięsień prosty uda, mięsień obszerny boczny, mięsień obszerny przyśrodkowy oraz mięsień obszerny pośredni) [1]. Badania były związane z określeniem wpływu czasu trwania ćwiczenia na spadek sił mięśniowych w obrębie stawu kolanowego.

Pierwsze przeprowadzone badanie polegało na jeździe na ergonometrze przy maksymalnym oporze, z maksymalną możliwą prędkością, przez 90 sekund (rysunek 2). Szybkość jazdy w początkowych 40 sekundach wynosiła 17 km/h, natomiast w kolejnych seriach ćwiczeń spadła do 7 km/h. Osoba badana w tym czasie przejechała średnio 200 metrów i spaliła ok.6 kcal. Ćwiczenie związane było z pracą beztlenową mięśni, co prowadziło do wystąpienia w mięśniach kwasu mlekowego. Badanie to było wyczerpujące, doprowadziło do dużego zmęczenia zawodnika, tzw. zakwasy utrzymywały się również dzień po badaniu. Badanie drugie zostało przeprowadzone dwa tygodnie później, zaobserwowano gorszą formą osoby badanej. Tym razem opór na ergonometrze ustawiono na średni poziom, a czas ćwiczenia wydłużono do 3 minut. Zawodnik utrzymywał stałą prędkość jazdy 12 km/h podczas wszystkich serii. Osoba badana pokonywała za każdym razem dystans 500m i spalała ok. 11kcal. Pomiar momentu sił mięśniowych przeprowadzano na fotelu do ćwiczeń oporowych, w pozycji siedzącej (rysunek 4) przed rozpoczęciem ćwiczeń, po każdej serii ćwiczeń, oraz ostatni, po odpoczynku. Pomiary przeprowadzono w zakresie kątów 15° - 90° (gdzie 0° odpowiada nodze wyprostowanej).

Badanie trzecie przeprowadzono z udziałem innej osoby. Polegało ono na badaniu zmęczenia mięśni podczas wykonywania przysiadu. Zawodnik musiał utrzymać ciało w pozycji „kucając” przez 45 sekund (rysunek 3). Wykonano 5 serii ćwiczeń. Kolejna osoba brała udział w czwartym badaniu, którego przebieg był identyczny jak badania trzeciego. Pomiar momentu sił mięśniowych przeprowadzano podobnie jak dla jazdy na ergonometrze.

Tabela 1. Kolejne serie ćwiczeń przeprowadzane podczas poszczególnych badań

Badanie 1	Badanie 2	Badanie 3 i 4
seria 1 pomiar bez rozgrzewki	seria 1 pomiar bez rozgrzewki	seria 1 pomiar bez rozgrzewki
seria 2 pomiar po jeździe na rowerku 1,5 min z maksymalnym obciążeniem	seria 2 pomiar po jeździe na rowerku 3 min ze średnim obciążeniem	seria 2 pomiar po 45 s. przysiadu
seria 3 pomiar po jeździe na rowerku 3 min z maksymalnym obciążeniem	seria 3 pomiar po jeździe na rowerku 6 min ze średnim obciążeniem	seria 3 pomiar po 1min 30 s. przysiadu
seria 4 pomiar po jeździe na rowerku 4,5 min z maksymalnym obciążeniem	seria 4 pomiar po jeździe na rowerku 9 min ze średnim obciążeniem	seria 4 pomiar po 2min 15s. przysiadu
seria 5 pomiar po jeździe na rowerku 6 min z maksymalnym obciążeniem	seria 5 pomiar po jeździe na rowerku 12 min ze średnim obciążeniem	seria 5 pomiar po 3min przysiadu
seria 6 pomiar po 10 min odpoczynku	seria 6 pomiar po jeździe na rowerku 15 min ze średnim obciążeniem	seria 6 pomiar po 3min 45s. przysiadu
	seria 7 pomiar po 30 min odpoczynku	seria 7 pomiar po 25 min odpoczynku



Rys. 2 Ćwiczenie na ergonetrze



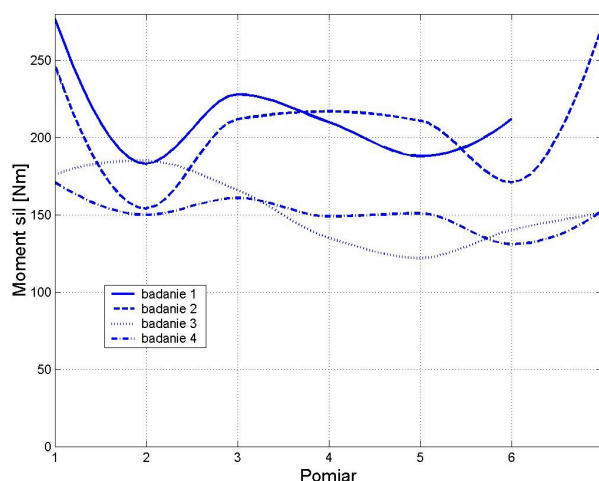
Rys. 3 Utrzymywanie pozycji ze zgiętymi kolanami



Rys. 4 Urządzenie pomiarowe

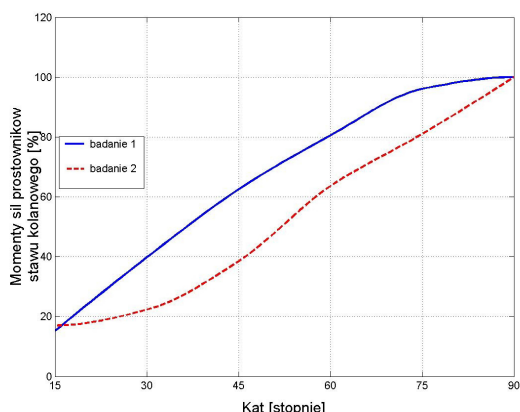
5. WYNIKI POMIARÓW

Podczas przeprowadzonych badań dokonywano pomiarów maksymalnego momentu sił prostowników stawu kolanowego podczas skurczu izometrycznego dla kątów od 15° do 90° (gdzie 0° odpowiada pełnemu wyprostowi). Przebieg zmian wartości momentu dla kąta 90° otrzymanych w kolejnych seriach pomiarów przedstawia rysunek 5. Pierwszy pomiar dokonywany był przed rozpoczęciem ćwiczeń, Ostatni natomiast po kilkunasto lub kilkudziesięciu minutowym odpoczynku.

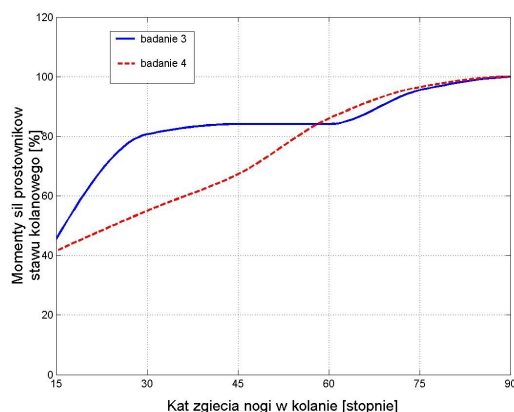


Rys. 5 Zmiany momentu sił mięśniowych prostowników stawu kolanowego przy nodze zgiętej pod kątem 90° . Poszczególne linie oznaczają kolejne badania (jak w tabeli 1)

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono zmiany wartości momentu sił mięśniowych dla kolejnych kątów otrzymane podczas pierwszych pomiarów przed rozpoczęciem ćwiczeń. Największe wartości otrzymano dla kątów zbliżonych do 90° , a najmniejsze dla kąta 15° , co jest zgodne z wynikami pomiarów dostępnych w literaturze [2].



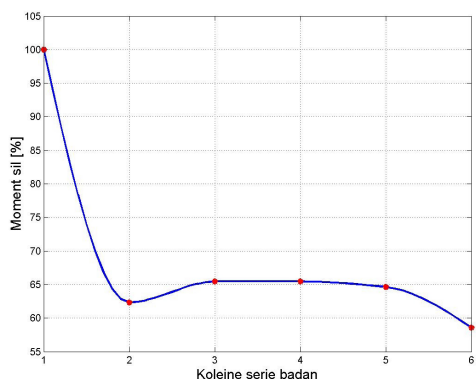
Rys. 6 Zmiana wartości momentów sił mięśniowych prostowników stawu kolanowego dla kolejnych kątów zgięcia nogi w stawie kolanowym. Wyniki otrzymane dla pomiarów przeprowadzonych przed rozpoczęciem pierwszej serii ćwiczeń na ergonometrze



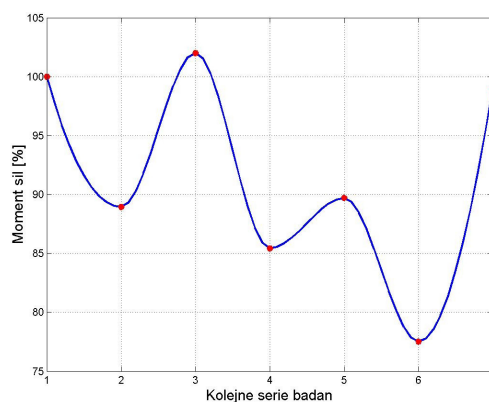
Rys. 7 Zmiana wartości momentów sił mięśniowych prostowników stawu kolanowego dla kolejnych kątów zgięcia nogi w stawie kolanowym. Wyniki otrzymane dla pomiarów przeprowadzonych przed rozpoczęciem pierwszej serii przysiadu

Rysunki 8, 9 i 10 przedstawiają uśrednione wartości momentów sił mięśniowych dla wszystkich kątów, otrzymane w kolejnych seriach badań (dla każdej serii dodawane były wartości momentów uzyskane dla kątów 15° do 90° , a następnie wyliczana była średnia. Za 100% przyjęto wartość z pierwszej serii). Przy jeździe na ergonometrze można zaobserwować, po początkowym spadku wartości momentu, chwilowy jego wzrost, a następnie znowu spadek. Przy pierwszym badaniu ćwiczący miał tylko 10 minut odpoczynku przed ostatnim pomiarem i stąd może wynikać jeszcze mniejsza wartość momentu sił niż zaraz po ćwiczeniu. Dla ćwiczeń, w których badany musiał utrzymywać

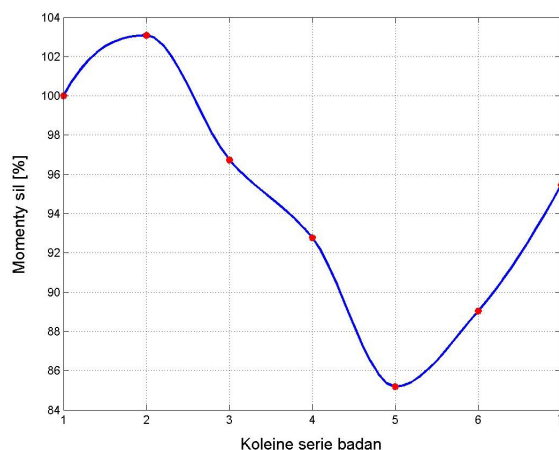
pozycję w przysiadzie, po pierwszej serii nastąpił wzrost wartości momentu, a po kolejnych następował spadek. Natomiast wzrost po ostatniej serii przed odpoczynkiem może być spowodowany niedostatecznym zaangażowaniem podczas pomiaru po serii 5.



Rys. 8 Uśrednione wartości momentów sił mięśniowych, otrzymane w kolejnych seriach badania pierwszego (Tabela 1) dla wszystkich kątów



Rys. 9 Uśrednione wartości momentów sił mięśniowych, otrzymane w kolejnych seriach badania drugiego (Tabela 1) dla wszystkich kątów



Rys. 10 Uśrednione wartości momentów sił mięśniowych, otrzymane w kolejnych seriach badania trzeciego i czwartego (Tabela 1) dla wszystkich kątów

6. PODSUMOWANIE.

Przedstawiona w pracy metodologia badań umożliwia określenie spadku siły mięśniowej podczas wykonywania ćwiczeń sportowych. Przeprowadzone doświadczenia wykonane zostały dla ćwiczeń anaerobowych.

Analiza otrzymanych rezultatów wskazuje na konieczność kontynuowania badań dla większej liczby osób.

LITERATURA

- [1] Bochenek A., Reicher M.: Anatomia człowieka. Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich, Warszawa 1978
- [2] Bober T., Zawadzki J.: Biomechanika układu ruchu człowieka. Wydawnictwo BK, Wrocław 2001
- [3] Konturek S.: Fizjologia człowieka. AGAT PRINT, Kraków 1992
- [4] Kozłowski S., Nazar K.: Wprowadzenie do fizjologii klinicznej. Warszawa: Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 1995r.
- [5] <http://www.spgorkaduch.friko.pl/publik/wydol1.htm>

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF DURATION OF THE EXERCISE ON THE VALUE OF KNEE EXTENSORS FORCES

Abstract. The way of fatigue of knee extensors during anaerobic exercises as well as courses of this changes are presented in the paper. A measuring device and anaerobic work of muscles are described.