

УДК 796.012:611.738

## **ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СКЕЛЕТНЫХ МЫШЦ ПОД ВЛИЯНИЕМ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ**

*Алла Владимировна Самсонова, доктор педагогических наук, профессор,  
Марина Андреевна Борисевич, доцент,*

*Ирина Эдуардовна Барникова, кандидат педагогических наук, доцент,  
Национальный государственный университет физической культуры, спорта и здоровья  
имени П.Ф. Лесгафта, Санкт-Петербург (НГУ им. П.Ф. Лесгафта, Санкт-Петербург)*

### **Аннотация**

Изучались результаты воздействия физической нагрузки (ФН) на механические свойства мышц. В эксперименте участвовали 34 студента НГУ им. П.Ф. Лесгафта специализации футбол. Посредством аппаратно-программного комплекса Вибрационный Вискоэластометр (ВВЭМ-05) регистрировались механические характеристики (упругость и вязкость) латеральной широкой мышцы бедра в расслабленном и напряженном состоянии до и после выполнения ФН. ФН заключалась в выполнении 35 прыжков вверх с места с заданием: «Выполнять прыжок в удобном темпе как можно выше». Длительность выполнения ФН составляла  $38,8 \pm 1,5$  с. РЕЗУЛЬТАТЫ: Показано, что после ФН достоверно возрастает ( $p \leq 0,05$ ) упругость латеральной широкой мышцы бедра (VL) как в расслабленном, так и напряженном состоянии. Вязкость мышцы достоверно увеличивается только в напряженном состоянии ( $p \leq 0,05$ ). В расслабленном состоянии изменение вязкости мышцы недостоверно ( $p > 0,05$ ). Возможно, это связано с тем, что у ряда спортсменов (15 футболистов) после выполнения ФН вязкость VL в расслабленном состоянии возрастает, а у других спортсменов (8 футболистов) – уменьшается. У 11 футболистов вязкость расслабленной мышцы достоверно не изменилась ( $p > 0,05$ ). На основании полученных данных исследования высказано предположение, что фактором, влияющим на показатели вязкости, может быть различная композиция мышечных волокон исследуемых спортсменов.

**Ключевые слова:** механические свойства скелетных мышц, вязкоупругие параметры, композиция мышечных волокон.

## **CHANGES IN MECHANICAL PROPERTIES OF SKELETAL MUSCLES UNDER THE INFLUENCE OF EXERCISE LOAD**

*Alla Vladimirovna Samsonova, the doctor of pedagogical sciences, professor,  
Marina Andreevna Borisevich, the senior lecturer,*

*Irina Eduardovna Barnikova, the candidate of pedagogical sciences, senior lecturer,  
The Lesgaft National State University of Physical Education, Sport and Health, St. Petersburg*

### **Annotation**

The aim of this research was to examine the influence of exercise stress (ES) on the mechanical properties of muscles. Thirty-four male football players, students of Lesgaft University participated in the current study. Mechanical properties (elasticity and viscosity) of the vastus lateralis (VL) in a relaxed and stress state before and after the ES were registered by a computer-assisted experimental tool - Vibratory Viskoelastometr (VVEM-05). ES consisted of 35 jump up in a place with the task to "Perform a jump as high as possible at a comfortable pace". The duration of the ES was  $38.8 \pm 1.5$  s.

RESULTS: It is shown that elasticity of the vastus lateralis (VL) is significantly increased after ES ( $p \leq 0.05$ ) both in a relaxed and stress condition. The viscosity of the muscle was significantly increased only in the stressed state ( $p \leq 0.05$ ). The changes in a viscosity of relaxed muscles are insignificant ( $p > 0.05$ ). Based on the data survey, it was suggested that the difference in viscosity might have been caused by a difference in athlete's muscle fiber composition.

**Keywords:** mechanical properties of skeletal muscles, viscoelastic characteristics, muscles fiber composition.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Эффекты воздействия физической нагрузки (ФН) на механические свойства скелетных мышц человека издавна привлекают внимание исследователей. Одним из первых

полномасштабное изучение этого вопроса осуществил Г.В. Васюков [2]. В дальнейшем эти исследования были продолжены другими учеными.

Было установлено, что напряженная скелетная мышца отличается от расслабленной большими показателями упругости [1, 2, 6, 7] и вязкости [2].

После выполнения спортсменом ФН показатели упругости и вязкости расслабленной мышцы увеличиваются, а напряженной – уменьшаются [2]. Однако К.К. Бондаренко с соавт. [1] показали, что при нарастании утомления в работающей мышце ее упругость возрастает, что противоречит исследованиям Г.В. Васюкова [2].

Рядом авторов было выдвинуто предположение [2, 6] о зависимости показателей вязкости и упругости скелетных мышц от их композиции (содержания быстрых и медленных мышечных волокон). Г.В. Васюков [2] установил, что после ФН вязкость быстрых мышц в расслабленном состоянии возрастает. Е.М. Тиманин и Е.В. Еремин [6] предположили, что изменения вязкости мышцы в процессе поддержания различных уровней изометрического напряжения вызваны тем, что быстрые и медленные мышечные волокна имеют разную вязкость.

Цель исследования состояла в изучении эффекта воздействия физической нагрузки (ФН) на механические свойства скелетных мышц человека.

### МЕТОДЫ И ОРГАНИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки механических свойств латеральной широкой мышцы бедра: упругости и вязкости применялся аппаратно-программный комплекс Вибрационный Вискоэластометр (ВВЭМ-05) [5] (рисунок 1).

С этой целью вибродатчик удерживался в руке оператора перпендикулярно поверхности мышцы на расстоянии 15 см от центра коленного сустава вдоль линии, соединяющей коленный и тазобедренный суставы в сагитальной плоскости. Непосредственно перед прижатием датчика (индентера) к мышце производилась его калибровка с целью установки нуля датчика статического давления.

Для повышения точности результатов измерение механических свойств расслабленной и напряженной мышцы до и после ФН проводилось трижды. Для этого выполнялось несколько записей, в ходе каждой из которых выполнялось несколько кратковременных прижатий индентера к скелетной мышце. При обмере записей определялись: эффективные модули упругости ( $E$ , кПа) и вязкости ( $V$ , Па с) для каждого из отдельных прижатий. После этого все результаты сохранялись в один файл и усреднялись посредством статистического пакета Statgraphics centurion. Выполнение трех записей по три прижатия и их последующее усреднение позволило уменьшить погрешность измерения средних значений механических свойств латеральной широкой мышцы бедра (VL).



Обозначения: 1– пользовательский интерфейс программы; 2– электронный согласующий блок, включающий USB модуль ввода-вывода сигналов; 3 – вибродатчик механических параметров тканей.

Рисунок 1 – Аппаратно-программный комплекс Вибрационный Вискоэластометр

В эксперименте приняли участие 34 студента НГУ им. П.Ф. Лесгафта специализации футбол. До выполнения физической нагрузки (ФН) регистрировались механические характеристики VL в расслаб-

ленном и напряженном состоянии. Затем исследуемые выполняли ФН, которая заключалась в выполнении 35 прыжков вверх с места с заданием: «Выполнять прыжок в удобном темпе как можно выше». Длительность выполнения ФН составляла  $38,8 \pm 1,5$  с. В течение последующих 60 с после выполнения ФН вновь регистрировались механические характеристики латеральной широкой мышцы бедра в расслабленном и напряженном состоянии.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты проведенного исследования представлены в таблице 1. Они свидетельствуют о следующем. Во-первых, как упругость, так и вязкость VL в напряженном состоянии достоверно выше, чем в расслабленном ( $p \leq 0,001$ ). Во-вторых, после ФН достоверно возрастает упругость латеральной широкой мышцы бедра ( $p \leq 0,05$ ) как в расслабленном, так и напряженном состоянии, а вязкость мышцы достоверно увеличивается только в напряженном состоянии ( $p \leq 0,05$ ). В расслабленном состоянии изменение вязкости VL недостоверно ( $p > 0,05$ ).

Таблица 1 – Изменение механических свойств латеральной широкой мышцы бедра под воздействием физической нагрузки ( $n=34$ )

Этап эксперимента	Эффективный модуль упругости (E), кПа			Эффективный модуль вязкости (V), Па с		
	Расслабление	Напряжение	Стат. вывод	Расслабление	Напряжение	Стат. вывод
До ФН	$7,0 \pm 0,3$	$17,1 \pm 1,4$	$p \leq 0,001$	$29,7 \pm 1,7$	$46,9 \pm 4,6$	$p \leq 0,001$
После ФН	$7,7 \pm 0,3$	$18,7 \pm 1,4$	$p \leq 0,001$	$30,9 \pm 2,0$	$53,7 \pm 6,2$	$p \leq 0,001$
Стат. вывод	$p \leq 0,05$	$p \leq 0,05$		$p > 0,05$	$p \leq 0,05$	

### ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные нами данные подтвердили результаты предыдущих исследований [1, 2, 6, 7] о том, что напряженная мышца достоверно превосходит расслабленную по упругости и вязкости ( $p \leq 0,001$ ) как до, так и после ФН.

Было также установлено, что после ФН упругость расслабленной латеральной широкой мышцы бедра достоверно увеличивается ( $p \leq 0,05$ ), что согласуется с результатами диссертационного исследования Г.В. Васюкова [2]. Однако в настоящем исследовании установлено, что вязкость расслабленной мышцы после ФН практически не изменяется ( $p > 0,05$ ), что противоречит данным Г.В. Васюкова [2].

По нашему мнению, недостоверные изменения вязкости латеральной широкой мышцы бедра под воздействием ФН могут быть связаны с ее разнонаправленными изменениями у обследуемых спортсменов. Так, например, у 15 футболистов после выполнения ФН вязкость мышцы в расслабленном состоянии достоверно возросла с  $31 \pm 3$  Па с до  $37 \pm 3$  Па с ( $p \leq 0,001$ ), у 8 спортсменов – достоверно уменьшилась с  $32 \pm 3$  Па с до  $26 \pm 3$  Па с ( $p \leq 0,05$ ), а у 11 футболистов достоверных изменений вязкости расслабленной мышцы не обнаружено. До ФН значение вязкости расслабленной мышцы у этой группы исследуемых было равно  $26,0 \pm 1,2$  Па с, а после –  $26,0 \pm 1,5$  Па с ( $p > 0,05$ ).

Г.В. Васюков [2] обратил внимание на тот факт, что после ФН вязкость быстрых мышц в расслабленном состоянии возрастает. Это позволяет предложить новые подходы к неинвазивной оценке композиции скелетных мышц человека, что очень важно для спортивной практики [4]. Можно предположить, что те футболисты, у которых вязкость латеральной широкой мышцы бедра после ФН возросла, имели большее количество быстрых мышечных волокон по сравнению с футболистами, у которых вязкость мышцы уменьшилась или осталась неизменной.

Было показано [1], что изменение механических характеристик скелетной мышцы при ее утомлении может быть связано с накоплением в мышце объемной доли. Известно, что при выполнении интенсивной ФН, длительность которой не превышает 40 с в мышцах спортсменов активно накапливается молочная кислота и другие продукты обмена [3]. При этом в большей степени изменяется объем быстрых мышечных волокон, ресинтез

АТФ которых основан на креатинфосфатном пути и анаэробном гликолизе. Изменение объема мышечных волокон может существенно повысить вязкость скелетной мышцы, то есть трение внутри мышцы. Поэтому мы предполагаем, что те спортсмены, у которых после ФН вязкость VL повысилась, имеют больше быстрых МВ по сравнению с теми футболистами, у которых этот показатель не изменился или уменьшился.

#### ВЫВОДЫ

1. Напряженная мышца достоверно превосходит расслабленную по упругости и вязкости ( $p \leq 0,001$ ) как до, так и после ФН.
2. После ФН упругость расслабленной мышцы достоверно увеличивается ( $p \leq 0,05$ ).
3. После ФН вязкость расслабленной мышцы достоверно не меняется ( $p > 0,05$ ). Возможно, это связано с различной композицией мышечных волокон в латеральной широкой мышце бедра в группе исследуемых спортсменов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко, К.К. Биомеханическая интерпретация данных миометрии скелетных мышц спортсменов / К.К. Бондаренко, Д.А. Черноус, С.В. Шилько // Российский журнал биомеханики. – 2009. – Т. 13. – № 1. – С. 7-17.
2. Васюков, Г.В. Исследование механических свойств скелетных мышц человека : автореф. дис. ... канд. биол. наук / Васюков Г.В. – М., 1967. – 17 с.
3. Михайлов, С.С. Спортивная биохимия : учебник для вузов и колледжей физической культуры / С.С. Михайлов. – М. : Советский спорт, 2009. – 348 с. – ISBN 978-5-9718-0619-6.
4. Методы оценки композиции мышечных волокон в скелетных мышцах человека / А.В. Самсонова, И.Э. Барникова, М.А. Борисевич, А.В. Вахнин // Труды кафедры биомеханики НГУ им. П.Ф. Лесгафта. – 2012. – Вып. 6. – С. 18-27.
5. Тиманин, Е.М. Теоретические и экспериментальные основы виброакустической вискоэластографии мягких биологических тканей : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Тиманин Евгений Михайлович. – Нижний Новгород, 2007. – 28 с.
6. Тиманин, Е.М. Изменения механических и электромиографических характеристик бицепса в процессе изометрического напряжения / Е.М. Тиманин, Е.В. Еремин. – Нижний Новгород : Препринт № 554, 2001. – 21 с.
7. Хайкова, М.И. Изменение механических свойств скелетных мышц человека при развитии ими напряжения : дис. ... канд. биол. наук / Хайкова Маргарита Ивановна. – М., 1984. – 176 с.

#### REFERENCES

1. Bondarenko, K.K., Chernous D.A. and Shilko, S.V. (2009), "Biomechanical interpretation of myometry of sportsmen skeletal muscles", *Russian Journal of Biomechanics*, Vol. 13, No. 1, pp.7-17
2. Vasyukov, G.V. (1967), *The study of the mechanical properties of human skeletal muscle*, dissertation, Moscow.
3. Mikhaylov, S.S. (2009), *Sport biochemistry: tutorial*, Soviet sport, Moscow
4. Samsonova, A.V., Barnikova, I.E., Borisevich, M.A. and Vakhnin, A.V. (2012) "Methods for assessing muscle fiber composition in human skeletal muscle", *Trudy kafedry biomekhaniki NGU imeni P.F. Lesgafta*, Vol. 6, pp. 18-27.
5. Timanin, E.M. (2007), *Theoretical and experimental bases vibroakustic viskoelastography soft biological tissue*, dissertation, Nizhny Novgorod.
6. Timanin, E.M. and Eremin, E.V. (2001), *Changes in mechanical and electromyographic characteristics of the biceps in the process of isometric tension*, preprint No.554, Nizhny Novgorod.
7. Khaykova, M.I. (1984), *Changes in mechanical properties of human skeletal muscles in their tension development*, dissertation, Moscow.

**Контактная информация:** [alla.samsonova.spb@gmail.com](mailto:alla.samsonova.spb@gmail.com)

*Статья поступила в редакцию 15.02.2017*