

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ ПАРАМЕТРОВ СКЕЛЕТНЫХ МЫШЦ ПО ДАННЫМ МИОМЕТРИИ

С.В. Шилько¹, Д.А. Черноус¹, К.К. Бондаренко²

1

Институт механики металлополимерных систем», г. Гомель

2

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины», г. Гомель

Эффективность спортивной деятельности в значительной степени определяется силовыми и скоростными показателями скелетных мышц спортсмена. Для решения актуальной задачи определения названных показателей, исходя из закономерностей мышечного сокращения, необходима полная информация о механических характеристиках биотканей мышц, экспериментальное определение которых затруднено необходимостью проведения измерений *in vivo*. Практикуемые биомеханические исследования препарированных мышц не позволяет с приемлемой точностью прогнозировать силовые и скоростные показатели мышцы непосредственно в организме.

Один из наиболее распространенных экспериментальных методов изучения свойств скелетных мышц *in vivo* подразумевает динамическое индентирование поверхности тела человека в области исследуемой мышцы, при котором определяется глубина внедрения, скорость индентора и усилие индентирования. Далее по известным зависимостям рассчитываются биомеханические характеристики; к примеру, на приборе «Миометр УТ 98-01» [1] автоматически определяются частота колебаний индентора F (Гц); декремент затухания D и жесткость H (Н/м), равная отношению максимального значения силовой реакции биоткани к максимальному внедрению индентора.

Ранее авторами [2;3] была разработана методика определения эффективных вязкоупругих характеристик материала скелетной мышцы по результатам поперечного динамического индентирования, осуществляемого прибором «Миометр УТ 98-01». Было показано, что использование классического решения контактной задачи об индентировании вязкоупругого полупространства позволяет перейти от условных миометрических параметров (F , D , H) к таким характеристикам, как модуль Юнга и время релаксации мышечной ткани.

Целью настоящей работы является изучение развития и совершенствования методики идентификации вязкоупругих характеристик скелетных мышц путем преодоления недостатков вышеназванной модели.

Ранее при анализе результатов миометрических измерений было выдвинуто предположение о том, что длительный модуль Юнга мышцы $E_{дл}$ пренебрежимо мал по сравнению с мгновенным модулем E . Мгновенный модуль Юнга определяет жесткость мышцы при динамическом, а длительный – при статическом нагружении. Предположение $E \gg E_{дл}$ равносильно пренебрежению жесткостью параллельного (по отношению к сократительному) упругого элемента в феноменологической вязкоупругой модели мышцы. В рамках сделанного допущения в работах [2; 3] были получены несложные аналитические соотношения, связывающие мгновенный модуль Юнга и время релаксации с миометрическими параметрами мышцы F , D , H . Уточненная математическая модель, учитывающая как динамическую, так и статическую жесткость мышцы, подразумевает численное решение системы четырех существенно нелинейных алгебраических уравнений.

Для апробации разработанной методики идентификации вязкоупругих характеристик мышцы были получены и проанализированы значения миометрических параметров различных скелетных мышц членов сборной команды Республики Беларусь по гребле на байдарках и каноэ. Миометрические исследования посредством прибора «Миометр УТ 98-01» проводились в научно-исследовательской лаборатории физической культуры и спорта Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. При использовании уточненного варианта методики было установлено, что для мышц верхних и нижних конечностей значение длительного модуля Юнга составляет 10–50% от соответствующего значения мгновенного модуля. Данное обстоятельство не позволяет при оценке вязкоупругих характеристик пренебрегать статической жесткостью мышцы и требует использования более точной (хотя и более сложной с точки зрения математического аппарата) методики идентификации.

Ранее также предполагалось, что модуль Юнга, определенный по результатам динамического индентирования мышцы в поперечном направлении, совпадает с соответствующим модулем для продольного направления. Вместе с тем, особенности внутренней структуры скелетных мышц приводят к существенным различиям в проявлении механических свойств для продольного и поперечного направлений. Жесткость мышцы на сжатие в продольном направлении практически равна нулю, а ее жесткость при растяжении значительно превышает жесткость в поперечном направлении. Так, при анализе миометрических показателей для двухглавой мышцы плеча нами определено значение длительного модуля Юнга 14,1 кПа, а из литературных источников [4] известно, что начальный модуль Юнга данной мышцы

при статическом растяжении достигает 500 кПа (под начальным модулем Юнга понимают значение производной от осевого напряжения по продольной деформации \square при $\square = 0$).

В связи с вышесказанным была предпринята попытка использовать значения вязкоупругих характеристик, полученные по результатам поперечного индентирования, для описания продольного деформирования мышцы. Для решения этой задачи авторами предлагается структурная модель материала скелетной мышцы в виде волоконно-армированного композита, в котором жесткость армирующих волокон существенно превышает жесткость матрицы. Модуль Юнга, определенный по результатам поперечного индентирования, сопоставляется с поперечным модулем Юнга данного композита. Используя диаграмму статического растяжения единичного мышечного моноволокна в пассивном состоянии [4], можно определить начальный длительный модуль Юнга в продольном направлении. Соотношения механики композитных материалов [5] позволяют при известных значениях продольного и поперечного модулей восстановить значения вязкоупругих характеристик и объемного содержания компонент армированного композита. Зная эти величины, можно описать напряженнодеформированное состояние скелетной мышцы при произвольном режиме нагружения.

Таким образом, в докладе доказана необходимость уточнения математической модели мышцы и модифицирована методика определения вязкоупругих характеристик скелетных мышц по результатам миометрических измерений, включая определение вязкоупругих модулей мышцы для продольного направления, исходя из ее характеристик, определенных при поперечном деформировании. Предполагается использовать полученные результаты в качестве объективного критерия состояния скелетных мышц с целью оптимизации тренировочной нагрузки с учетом индивидуальных возможностей спортсменов.

Литература

1. Miometer UT 98-01. University of Tarty, 2002 – 49 p.
2. Шилько, С.В. Метод определения *in vivo* вязкоупругих характеристик скелетных мышц / С.В. Шилько, Д.А. Черноус, К.К. Бондаренко // Russian Journal of Biomechanics. – 2007. – Vol. 11, № 1. – P. 4554.
3. Бондаренко, К.К. Биомеханическая интерпретация данных миометрии скелетных мышц спортсменов / К.К. Бондаренко, С.В. Шилько, Д.А. Черноус // Российский журнал биомеханики. – 2009. – Т. 13, № 1. – С. 7–17.
4. Lieber, R.L. Skeletal muscle mechanics: implications for rehabilitation / R.L. Lieber, S.C. BodineFowler // Physical Therapy. – 1993. – Vol. 73. – P. 844–856.
5. Кристенсен, Р. Введение в механику композитов / Р. Кристенсен. – М.: Мир, 1982. – 334 с.