

## ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

УДК 531/534:57+61

### **Диагностические возможности миометрии для прогнозирования утомления скелетных мышц при выполнении тренировочных упражнений**

Шилько С.В.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент,

Черноус Д.А.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

Плескачевский Ю.М.<sup>2</sup>, д-р техн. наук, чл.-корр. НАН Беларуси

*<sup>1</sup>ГНУ ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь*

*<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*

Прогнозирование утомления скелетных мышц необходимо для назначения эффективного и атравматичного режима тренировок спортсменов. В этой связи востребованы технические средства быстрой и неинвазивной диагностики текущего состояния мышц, которые характеризуются генерируемым усилием, скоростью сокращения, эластичностью мышцы и работой, совершаемой при мышечном сокращении.

Для расширения возможностей миометрии, используемой для диагностики состояния мышц спортсменов, авторами разработана биомеханическая модель процесса утомления скелетной мышцы. Функционирование сократительного элемента модели мышцы осуществляется на основе эмпирического уравнения Хилла [1]. Показано, что результаты использования предложенного подхода практически совпадают с расчетными оценками, полученными в рамках значительно более сложной гипотезы «скользящих нитей» [2]. Учет вязкости материалов мышечной ткани позволил уточнить расчетную оценку скорости выделения энергии при сокращении мышцы. Установлено, что инерционные силы и неоднородность распределения напряжений по длине мышечного волокна не оказывают сколь либо заметного влияния на кинематические и силовые параметры скелетных мышц человека. Определена математическая связь между параметрами разработанной модели и характеристиками актомиозинового взаимодействия в мышце. В

рамках разработанной модели комплексно учитываются упругость и вязкость мышечной ткани, разнородность моноволокон в мышце и процесс накопления утомления.

Одно из преимуществ разработанной модели состоит в возможности идентификации исходных параметров по данным миометрических измерений и результатам стандартных испытаний мышц на изотоническое сокращение. Так, значения вязкоупругих характеристик скелетных мышц были определены путем обработки данных, полученных в НИЛ физической культуры и спорта ГГУ им. Ф.Скорины при миометрической диагностике членов сборной команды Республики Беларусь по гребле на байдарках и каноэ прибором «Миометр UT98-01» [3]. Установлено, что значение мгновенного модуля упругости мышечной ткани изменяется в пределах от 45 кПа (трехглавая мышца плеча) до 14 кПа (мышцы брюшного пресса). Время релаксации составило от 70 мс (наружные косые мышцы живота) до 25 мс (трапециевидные мышцы).

Регистрируя изменение миометрических показаний в ходе выполнения физических упражнений, можно определить значение показателя, введенного в работе [4], характеризующего утомление в мышце. Показано, что снижение эффективности работы скелетной мышцы с ростом количества выполняемых упражнений может быть описано экспоненциальной функцией, показатель которой непосредственно интерпретируется, как коэффициент утомления. В качестве примера использования данной методики идентификации был определен коэффициент утомления для икроножной мышцы спортсмена-легкоатлета при выполнении упражнения по подъему на стопе. Установлено, что введенный в модели коэффициент утомления составляет 0,45.

Для идентификации параметров, характеризующих поведение сократительного элемента, использованы известные из литературы экспериментальные зависимости установившейся скорости изотонического сокращения  $v$  от нагрузки  $P$  на мышцу [2]. При анализе данных зависимостей удастся установить не только параметры уравнения Хилла, но и характеристику вязкости мышечной ткани. На примере портняжной мышцы показано, что значение времени релаксации, определенное по данным миометрических измерений на приборе «Миометр UT98-01»,

практически совпадает с соответствующим значением, определенным при аппроксимации зависимости  $v(P)$ .

В рамках разработанной модели скелетная мышца рассматривается как система, состоящая из множества моноволокон различной длины и конфигурации. Предложен и апробирован метод идентификации параметров распределения по длине моноволокон в мышце. Данный метод подразумевает получение и анализ экспериментальной диаграммы растяжения исследуемой мышцы в пассивном состоянии. В результате использования модели было показано, что именно учет крутки мышечных волокон позволяет адекватно описать начальные стадии изотонического сокращения и изометрической активации скелетной мышцы [4]. При этом удастся получить приемлемую расчетную оценку времени «запаздывания» процесса сокращения.

Разработанная модель была использована для расчета функциональных параметров мышц при циклической активации, соответствующей выполнению различных физических упражнений и вибростимуляции [5]. Получены зависимости амплитуды сокращения, генерируемой силы, общей затраченной энергии и совершенной механической работы от времени и частоты возбуждения. Установлен нелинейный характер возрастания скорости выделения энергии в мышце с увеличением количества циклов активации. Показано, что определяющее влияние на величину необходимой для реализации требуемого режима сокращения мощности оказывают реономные характеристики материала мышечной ткани.

При относительно высоких значениях времени релаксации (выше 50 мс) обнаруживается явление снижения необходимой затрачиваемой мощности на первых циклах выполнения упражнения. Установлено, что при прочих равных условиях скорость сокращения тем меньше, чем больше время релаксации биоматериала. К снижению скорости сокращения также приводит утомление мышцы. При большом (более 20) числе циклов активации значение необходимой мощности значительно возрастает, что обусловлено накоплением утомления. Показано, что принятая в рамках разработанной модели гипотеза о пропорциональном уменьшении максимальной силы, генерируемой

мышцей, с ростом общей затраченной энергии позволяет количественно оценить влияние утомления мышцы на кинематику описываемого циклического процесса. Обоснована необходимость учета конфигурации (разнодлиности, скрученности и разнонаправленности) мышечных моноволокон для адекватного описания процесса восстановления размеров и функциональных параметров мышцы после завершения процесса циклической активизации.

Таким образом, разработана и апробирована методика описания и прогнозирования кинематических, силовых и энергетических параметров функционирования скелетных мышц человека с учетом утомления. Характеристики мышцы определяются по результатам миометрии методом динамического контактного индентирования в режиме *in vivo*. Разработанный подход позволяет разработать миометры с расширенными функциями для оптимизации тренировочного процесса и реабилитации спортсменов.

1. Hill, A.V. First and last experiments in muscle mechanics / A.V. Hill. – Cambridge, 1970. – 141 p.

2. Дещеревский, В.И. Математические модели мышечного сокращения / В. И. Дещеревский ; АН СССР, Ин-т биол. физики ; под ред. акад. Г. М. Франка. - М. : Наука, 1977. - 160 с.

3. Miometer UT 98-01. University of Tarty, 2002 – 49 p.

4. Shilko, S.V. Nonlinear deformation of skeletal muscles in a passive state and in isotonic contraction / S.V. Shilko, D.A. Chernous, Yu.M. Pleskachevsky // Mechanics of Composite Materials. – 2012. – Vol. 48. – № 3. – P. 331-342.

5. Плескачевский, Ю.М. Оптимизация тренировочного процесса и реабилитации спортсменов на основе динамической контактной диагностики скелетных мышц / Ю.М. Плескачевский [и др.] // Тез. МНК Россия-Беларусь-Сколково : единое иннов. пространство РБС 2012. – Минск, 19 сент. 2012. – С. 124-125.