

УДК 577.3

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕМЕМБРАНИЗОВАННЫХ МЕДЛЕННЫХ МЫШЕЧНЫХ ВОЛОКОН КРОЛИКА

© 2021 г. С.Р. Набиев*, С.Ю. Бершицкий*, А.К. Цатурян**, Н.А. Кубасова**

*Институт иммунологии и физиологии УрО РАН, 620049, Екатеринбург, ул. Первомайская, 106

**Институт механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, 119192, Москва, Мичуринский просп., 1

E-mail: natalia@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 04.12.2020 г.

После доработки 05.12.2020 г.

Принята к публикации 22.12.2020 г.

Изучены температурные зависимости напряжения и жесткости активно сокращающихся одиночных волокон медленной (*m. soleus*) мышцы кролика с помощью джоулевого скачка температуры. Показаны различия в характеристиках волокон быстрой (*m. psoas*) и медленной (*m. soleus*) мышцы кролика, вызванные, по-видимому, различиями в кинетике цикла миозиновой головки.

Ключевые слова: мышечное сокращение, изометрическое напряжение, скачок температуры.

DOI: 10.31857/S0006302921020174

Основополагающие работы в области исследования механизма мышечного сокращения были сделаны на быстрых волокнах скелетных мышц. Было показано, что развитие активной силы происходит за счет движения миозиновой головки, присоединенной к актину, либо поворота части головки, так называемого рычага, относительно ее актинсвязывающего домена, и предложены соответствующие модели [1, 2]. Казалось бы, величина развиваемой силы должна быть прямо пропорциональна числу присоединенных к актину миозиновых головок, и это число можно оценить по динамической (т.е. измеренной при быстрых изменениях длины) жесткости мышечного волокна. Однако эксперименты на активно сокращающихся волокнах быстрых скелетных мышц, выполненные при различных значениях температуры, показали, что наблюдаемый значительный рост силы с ростом температуры – четырех-пятикратный в мышце кролика при нагревании от 5°C до 35°C [3, 4] и в 1.7 раза при увеличении температуры мышцы лягушки от 4°C до 17°C [5, 6] – не сопровождается, либо сопровождается небольшим, не более 15%, ростом жесткости [3–6]. Это наблюдение, подкрепленное анализом изменений на рентгенодифракционных диаграммах активно сокращающихся мышечных волокон кролика в ответ на скачок температуры, привело к созданию новой структурно-кинетической модели актин-миозинового взаимодействия [7]. Согласно этой модели, развитие активного напря-

жения происходит в два шага. Сначала миозиновая головка слабо присоединяется к актину, не участвуя в генерации силы, но внося вклад в жесткость мышцы, затем она «застегивается», т.е. переходит в прочно связанное состояние и уже в ходе этого перехода развивает некоторую силу, и лишь на следующем шаге цикла взаимодействия с актином происходит поворот рычага. Таким образом, сила, развиваемая мышцей в изометрическом сокращении, пропорциональна не общему количеству присоединенных головок, а лишь числу тех из них, которые присоединены в последнем состоянии с повернутым рычагом, а жесткость – числу всех присоединенных головок.

В то же самое время исследование механики актин-миозинового взаимодействия в медленных скелетных мышцах, ничуть не менее важных с физиологической точки зрения, носило лишь фрагментарный характер. В экспериментах на волокнах медленных мышц, часто проводившихся параллельно с экспериментами на волокнах быстрых мышц этих же животных, были получены классические биофизические характеристики: кривая «сила–скорость» для волокон мышц морской свинки [8] и температурная зависимость кальциевой чувствительности силы для мышц крысы [9, 10]. Похожие эксперименты были выполнены примерно в то же время и в других лабораториях [11–13]. Было высказано предположение, что наблюдаемые различия механических

свойств медленных и быстрых волокон скелетных мышц могут быть вызваны различием изоформного состава тяжелых цепей миозина в быстрых и медленных мышцах с различной кинетикой их рабочего цикла [14].

В сравнительных экспериментах на волокнах мышц человека, содержащих различный набор тяжелых цепей миозина, с использованием усовершенствованной аппаратуры (более быстрый мотор для изменения длины мышцы, динамический контроль изменения длины саркомеров) были измерены не только характеристики стационарной связи сила-скорость при укорочении и растяжении этих мышц, но и их кинетические характеристики – скорость восстановления силы после малых и больших ступенчатых изменений длины и динамическая жесткость волокон при изометрических сокращениях и при растяжении с различной скоростью [15]. Были выявлены существенные различия свойств медленных и быстрых мышц. Однако в этих экспериментах динамическая жесткость была измерена лишь при одном значении температуры (12°C), далеко от физиологической для теплокровных. Температурная зависимость изометрического напряжения и динамической жесткости волокон камбаловидной (медленной) мышцы человека была исследована в интервале температур $5\text{--}20^{\circ}\text{C}$ [16]. Было показано, что динамическая жесткость волокон медленных мышц меняется в этом интервале температур значительно сильнее, чем волокон быстрых мышц. Следует заметить, что экспериментальные образцы волокон мышц человека не относились к чистым быстрым и медленным типам мышц, а содержали небольшую долю других изоформ миозина [15].

Новые эксперименты на одиночных волокнах камбаловидной мышцы кролика [17] подтвердили выводы, сделанные в работе [16]. Гель-электрофорезный анализ показал, что содержание быстрых изоформ миозина в волокнах *m. soleus* кролика пренебрежимо мало. Было показано, что при постоянной температуре 12°C увеличение уровня кальциевой активации волокна вело к увеличению как изометрического напряжения, так и жесткости полусаркомера. Авторами была предложена модель, объясняющая такое поведение напряжения и жесткости. Одно из важнейших предположений модели состояло в том, что жесткость одиночной миозиновой головки в волокнах медленной мышцы в три раза меньше, чем в быстрой. Этот вывод согласуется с прямыми измерениями жесткости одиночных миозиновых головок в оптической ловушке [16].

Поскольку во всех вышеописанных экспериментах температура не превышала 20°C , нам показалось важным дополнить исследования температурной зависимости напряжения и динами-

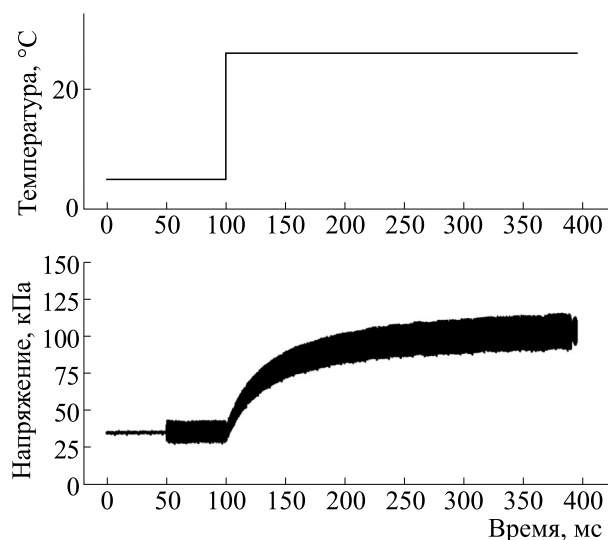


Рис. 1. Экспериментальный протокол. Синусоидальные изменения длины прикладывали к волокну за 50 мс до скачка температуры. Продолжительность записи варьировали так, чтобы было достигнуто установившееся значение напряжения при высокой температуре.

ческой жесткости медленных волокон при более высоких значениях температуры вплоть до физиологической.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксперименты были выполнены на лабораторной установке, основные узлы которой описаны в работах [4, 18]. В качестве объекта исследования нами были выбраны демембранизованные медленные мышечные волокна из камбаловидной (*m. soleus*) мышцы кролика. Состав растворов, методика выделения и работы с одиночным мышечным волокном описаны в работе [19]. После завершения экспериментов волокна подвергали гель-электрофорезному анализу, показывающему содержание в волокне различных изоформ миозина. Во всех экспериментальных образцах была обнаружена только тяжелая цепь миозина 1 – медленная изоформа миозина.

Волокно, закрепленное одним концом на линейном моторе, а другим – на датчике силы, перемещали из камеры с расслабляющим раствором в камеру с активирующим раствором при температуре 2°C , где его выдерживали около 5 с. Активированное волокно перемещали в воздушную камеру с температурой 5°C , где к волокну были приложены синусоидальные изменения длины и джоулев скачок температуры (рис. 1). Амплитуда скачка температуры составляла от 15°C до 30°C . Скачок температуры получали пропусканием высоковольтного импульса переменного тока частотой 40 кГц и длительностью 0.2 мс. До-

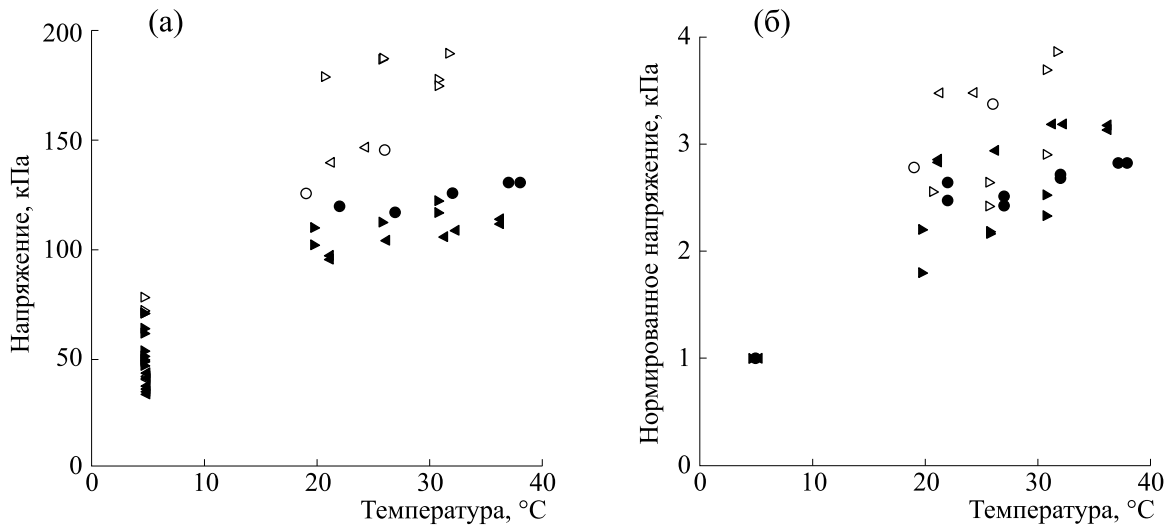


Рис. 2. Изменение напряжения волокна в ответ на скачок температуры: (а) — абсолютные значения напряжения до (5°C) и после скачка температуры; (б) — те же значения, нормированные на соответствующее напряжение до скачка температуры. Разные символы соответствуют разным волокнам ($n = 6$). Светлые и темные символы соответствуют двум сериям экспериментов.

полнительно для компенсации остывания волокон прикладывали малоамплитудный импульс переменного тока продолжительностью до 400 мс. Частота синусоидальных изменений длины волокна составляла 1.6 кГц, амплитуда — 0.1% длины волокна. Все измерения на волокне происходили под контролем длины саркомеров, начальная длина саркомеров в центральной части волокна была 2.4–2.5 мкм. К сожалению, не удалось получить достоверного сигнала изменений длины саркомеров в ответ на синусоидальные изменения длины волокна до и после скачка температуры. Количество циклов «активация–расслабление» одного волокна составляло от 6 до 12.

Для обработки результатов экспериментов была написана программа на языке Python. Жесткость оценивали как отношение амплитуд синусоид, аппроксимирующих изменения напряжения и длины волокна. Интервал для аппроксимации составлял два полных периода колебаний длины с центром в выбранной точке по времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В наших экспериментах к волокнам были приложены скачки температуры от 15°C до 32°C , что соответствовало финальным температурам волокна от 20°C до 37°C соответственно. При меньших амплитудах скачка температуры не удавалось обеспечивать подогрев волокна в течение такого времени, какое было необходимо для достижения медленными мышечными волокнами стационарного напряжения.

Значения стационарного напряжения при различных значениях финальной температуры показаны на рис. 2. Видно, что основные изменения напряжения происходили в интервале температур от 5°C до 20°C , а в диапазоне 20 – 37°C изменения были незначительны.

Абсолютные и нормированные на соответствующее значение при 5°C величины напряжения и жесткости, наблюдавшиеся в экспериментах, сведены в группы по значениям температуры, достигнутой после скачка, и показаны в таблице. Видно, что разброс абсолютных значений напряжения и жесткости был достаточно большим, но после нормирования разброс существенно уменьшался. Изменения жесткости наблюдали при изменении температуры от 5°C до 20°C , в дальнейшем жесткость оставалась постоянной в пределах статистической погрешности. На рис. 3 показана зависимость абсолютных и нормированных значений жесткости от напряжения.

Кинетику изменений напряжения и жесткости характеризовали «полувремением», т.е. временем, за которое изменение величины достигало половины своего максимального значения. Температурные зависимости полувремени роста напряжения и жесткости показаны в координатах Арениуса на рис. 4. Видно, что несмотря на существенный разброс данных, напряжение имеет большую температурную зависимость, чем жесткость. Угол наклона аппроксимирующей прямой для напряжения составлял -5.03 ± 0.95 ($n = 32$, здесь и далее: взвешенное среднее \pm взвешенное стандартное отклонение), соответствующее значение для жесткости -2.86 ± 0.61 ($n = 7$).

Экспериментальные данные

Средняя температура	Напряжение T , кПа	T_{norm}	$t_{0.5T}$, мс	Жесткость S , МПа	S_{norm}	$t_{0.5S}$, мс
5	44.1 ± 14.1 (38)	1		9.03 ± 2.65 (21)	1	1
21	120.0 ± 26.2 (9)	2.6 ± 0.5 (9)	47.0 ± 18.4 (2)	12.61 ± 2.61 (6)	1.51 ± 0.28 (6)	52.7 ± 15.2 (2)
26	132.6 ± 32.2 (10)	2.7 ± 0.5 (9)	24.5 ± 4.9 (2)	14.18 ± 3.66 (7)	1.54 ± 0.33 (7)	35.7 ± 9.5 (2)
31	137.9 ± 32.6 (9)	3.0 ± 0.5 (9)	14.5 ± 1.4 (2)	13.18 ± 2.97 (6)	1.47 ± 0.33 (6)	23.5 ± 1.4 (2)
37	121.0 ± 10.4 (4)	3.0 ± 0.3 (4)	10 (1)	10.10 ± 0.25 (2)	1.47 ± 0.22 (2)	18 (1)

Примечание. Значения, измеренные после скачка температуры, сгруппированы по финальной температуре. Отклонения температуры от среднего значения, указанного в таблице, не превышали 1°C. В каждой клетке показано среднее значение \pm стандартное отклонение. В скобках указано число измерений. Для сравнения относительных изменений напряжение и жесткость нормировали на соответствующие значения до скачка температуры, при 5°C, нормированные значения обозначены T_{norm} и S_{norm} . $t_{0.5T}$, $t_{0.5S}$ – полувремени ответов напряжения и жесткости.

Для оценки температурной зависимости жесткости использовали два волокна (рис. 4б). Температурная зависимость напряжения для соответствующей пары волокон (рис. 4а, точки) имела угол наклона -4.51 ± 0.41 ($n = 14$). Сгруппированные по величине финальной температуры значения полувремени для напряжения и жесткости показаны в таблице. Можно заметить, что полувремя для ответа жесткости всегда было больше, чем полувремя для ответа напряжения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Интересно сравнить полученные результаты с соответствующими параметрами волокон быстрой (m. psoas) мышцы кролика [4, 20]. В экспериментах, описанных в работе [20], исследуемый диапазон температур составлял 5–20°C и не достигал значений, близких к физиологическим. В работе [4] было показано, что рост изометрического напряжения происходит во всем диапазоне температур 5–37°C. При температурах выше 30°C

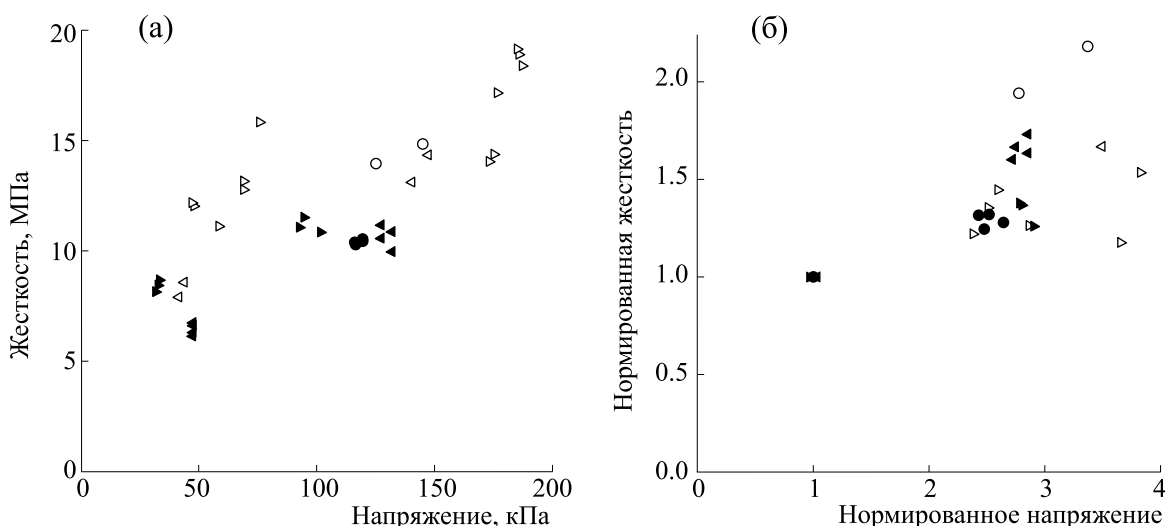


Рис. 3. Изменение жесткости волокна в ответ на скачок температуры: (а) – абсолютные значения напряжения до скачка температуры (5°C) и установившиеся после скачка температуры; (б) – те же значения, нормированные на соответствующее напряжение до скачка температуры. Разные символы соответствуют разным волокнам ($n = 6$). Светлые и темные символы соответствуют двум сериям экспериментов.

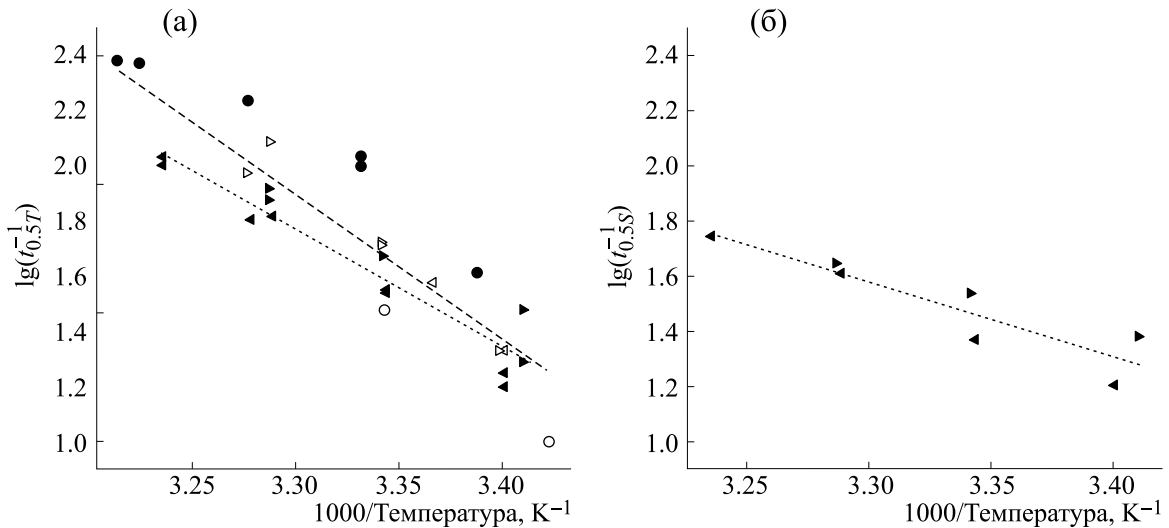


Рис. 4. Температурные зависимости изменений напряжения (а) и динамической жесткости (б) в ответ на скачок температуры, выраженные графиками Аррениуса. По оси x отложены обратные температуры в градусах Кельвина, умноженные на тысячу. По оси y – десятичный логарифм величины, обратной времени достижения напряжением либо жесткостью половины разницы между стационарными значениями. Соответствующие «полувремена» обозначены $t_{0,5T}$ и $t_{0,5S}$. Угловым коэффициентом для напряжения составлял $k = -5.0$ (пунктирная линия, 6 волокон, 32 точки); для двух волокон, использовавшихся для определения температурной зависимости жесткости $k = -4.5$ (точечная линия, 2 волокна, 15 измерений). Для жесткости $k = -2.9$ (линия показана точками, 2 волокна, те же символы, что и на рис. (а), 7 измерений).

рост замедлялся, однако напряжение по-прежнему увеличивалось с увеличением температуры [4]. В наших экспериментах рост напряжения в диапазоне температур 20–37°C был постоянным, но незначительным. Основные изменения напряжения в медленных волокнах происходили в интервале 5–20°C. Рост напряжения при изменении температуры от 5°C до 20°C составил 2.61 (см. таблицу), а от 5°C до 30°C был трехкратным. Небольшое и статистически недостоверное падение напряжения при возрастании температуры до 37°C, по-видимому, связано с недостаточной мощностью подогревающего импульса. В экспериментах на волокнах из *m. soleus* человека рост напряжения в диапазоне температур от 5°C до 20°C составлял 3.98 [16].

Наиболее яркие отличия между двумя типами мышц проявляются в температурной зависимости жесткости. Если в волокнах быстрой мышцы кролика изменение жесткости с температурой незначительно [4, 20], то в волокнах медленной мышцы человека четырехкратный рост напряжения при изменении температуры от 5°C до 20°C сопровождался двукратным ростом жесткости (2.18 по данным в работе [16]). В наших экспериментах жесткость при изменении температуры от 5°C до 20°C росла в среднем в полтора раза, при дальнейшем увеличении температуры до 30–37°C жесткость не изменялась (таблица).

Наши результаты согласуются с данными работы [21], авторы которой также наблюдали из-

менения напряжения и жесткости в медленных *m. soleus* волокнах кролика в ответ на изменения температуры. Максимальные изменения были зарегистрированы в интервале температур от 5°C до 20°C, дальнейший рост напряжения был незначительным, жесткость в описываемых экспериментах также не зависела от температуры при температурах, больших 20°C. Отметим, что в работе [21] волокно активировали при высокой температуре, что ведет к неоднородной активации и разбросу длин саркомеров в волокне, а частоты синусоидальных колебаний не превышали 500 Гц, что не позволяет достоверно оценить динамическую жесткость, т.к. на этих временах успевают произойти изменения структурного и механического состояния миозиновых головок.

Значения изометрического напряжения и жесткости в волокнах *m. soleus* кролика были измерены при температуре 12°C и различных уровнях кальциевой активации [17]. Среднее напряжение при максимальном pCa составляло 141 кПа, что выше измеренного нами при 20°C. Податливость полусаркомера составляла 39.5 ± 4.7 нм/МПа, что для средней длины саркомера в указанных экспериментах 2.4 мкм соответствует удельной жесткости $2400/2/39.5 = 30.4$ МПа. Титрованием уровня кальциевой активации был получен широкий диапазон значений напряжения волокна и измерены соответствующие значения жесткости. Интересно, что, как и в наших экспериментах, при напряжениях ниже 120 кПа жесткость с ростом напряжения

существенно увеличивалась, но ее рост замедлялся до едва заметного при превышении этого уровня напряжения.

Известно, что в волокнах быстрой мышцы не-большой рост жесткости после скачка температуры опережает рост напряжения (см, например, рис. 8 в работе [4]). Мы характеризовали кинетику нарастания напряжения и жесткости в ответ на скачок температуры величиной полувремени изменения соответствующей величины (таблица, рис. 4). В отличие от волокон быстрых мышц в наших экспериментах рост напряжения не отстал от роста жесткости и даже опережал его.

Различия в кинетике механических процессов для медленного и быстрого миозина были описаны ранее. Максимальная скорость укорочения медленных волокон была примерно вдвое меньше, чем быстрых для мышц морской свинки [8], крысы [13], трески [12] и человека [22] в широком диапазоне температур вплоть до физиологической для животных данного вида. Еще большее, более чем пятикратное, различие скорости движения актиновых филаментов по поверхности, покрытой медленным и быстрым миозином из мышц крыс и кроликов, было обнаружено в экспериментах в искусственной подвижной системе (*in vitro motility assay*) [23]. Аналогичные результаты были получены в экспериментах, в которых изучали движение не актиновых филаментов, а реконструированных тонких нитей, причем для реконструкции использовали тропонин и тропомиозин из медленных и быстрых мышц соответственно [24]. В этой же работе в опытах с оптической ловушкой также было обнаружено трехкратное увеличение среднего времени пребывания одиночных головок медленного миозина в присоединенном к актину состоянии по сравнению с быстрым миозином [24]. Эти данные хорошо согласуются с результатами измерения АТФазной активности медленных и быстрых волокон человека, сокращающихся в изометрических и изотонических условиях при 10°C и 20°C [22], которые показали, что доля времени, которое головка миозина медленных мышц проводит в прочно связанном с актином состоянии, в несколько раз больше, чем для миозиновых головок в быстрых волокнах, а также с оценкой доли присоединенных к актину головок в активном изометрическом сокращении медленных и быстрых волокон кролика при 12°C – 0.47 и 0.29 соответственно [17].

Различия кинетики биохимических процессов, лежащих в основе механической активности медленных и быстрых мышц, еще более значительны. Скорость снижения механического напряжения в ответ на фотоиндуцированное увеличение концентрации неорганического фосфата в медленных волокнах мышц кролика при 20°C бы-

ла в 33 раза меньше, чем в быстрых; при 10°C различие становилось 84-кратным [25]. Снижение напряжения в этих экспериментах было связано с ассоциацией фосфата с комплексом миозин–АДФ, образовавшимся в результате сброса фосфата из активного центра миозиновой головки после гидролиза АТФ, и обращением ее силогенерирующего шага. Эксперименты, в которых механические и структурные изменения в медленных и быстрых волокнах мышц крысы были инициированы импульсным фотоиндуцированным выделением АТФ в присутствии и в отсутствие ионов Ca^{2+} , показали [26], что головки медленного миозина связывают АДФ намного прочнее и развивают активное напряжение примерно в пять раз медленнее, чем головки быстрого миозина. Простая кинетическая модель рабочего цикла миозиновой головки в медленной мышце была предложена в работе [16]. Тем не менее существующих экспериментальных данных еще недостаточно для определения всех параметров подобных моделей.

В нашей работе мы показали, что отличия в механических характеристиках медленных и быстрых волокон проявляются в широком диапазоне температур вплоть до физиологической. В ответ на скачок температуры в волокнах быстрых мышц происходит быстрый переход слабосвязанных миозиновых головок в силогенерирующее состояние без существенного увеличения числа присоединенных к актину головок [7]. Поскольку в медленных волокнах при увеличении температуры не только напряжение, но и жесткость изменяется существенно, мы полагаем, что в этих волокнах скачок температуры вызывает два процесса: увеличение доли силогенерирующих головок за счет слабосвязанных и увеличение общего числа присоединенных головок.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Г.В. Копыловой и А.М. Кочуровой за помощь в анализе изоформного состава миозина в экспериментальных образцах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-04-00599, и госпрограмм АААА-А18-118020590135-3 и АААА-А19-119012990119-3.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Все применимые международные, национальные и институциональные принципы ухода и использования животных при выполнении работы были соблюдены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. F. Huxley and R. M. Simmons, *Nature* **233**, 533 (1971).
2. K. C. Holmes, *Curr Biol.* **7** (2), R112 (1997).
3. S. Y. Bershitsky and A. K. Tsaturyan, *Biophys. J.* **56** (5), 809 (1989).
4. S. Y. Bershitsky, A. K. Tsaturyan, *J. Physiol.* **540** (1), 971 (2002).
5. A. K. Tsaturyan, S. Y. Bershitsky, R. Burns, et al., *Biophys. J.* **77** (1), 354 (1999).
6. G. Piazzesi, M. Reconditi, N. Koubassova, et al., *J. Physiol.* **549** (1), 93 (2003).
7. M. A. Ferenczi, S. Y. Bershitsky, N. Koubassova, et al., *Structure* **13** (1), 131 (2005).
8. J. Gulati, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **73** (12), 4693 (1976).
9. D. J. Stephenson and D. A. Williams, *J. Physiol.* **317**, 281 (1981).
10. D. J. Stephenson and D. A. Williams, *J. Physiol.* **360**, 1 (1985).
11. K. W. Ranatunga, *Exp. Neurol.* **70** (2), 211 (1980).
12. J. D. Altringham and I. A. Johnston, *J. Physiol.* **333**, 421 (1982).
13. K. W. Ranatunga, *J. Physiol.* **351**, 517 (1984).
14. P. J. Reiser, R. L. Moss, G. G. Giulian, et al., *J. Biol. Chem.* **260**, 9077 (1985).
15. M. Linari, R. Bottinelli, M. A. Pellegrino, et al., *J. Physiol.* **554**, 335 (2004).
16. B. Brenner, N. Hahn, E. Hanke, et al., *J. Muscle. Res. Cell Motil.* **33** (6), 403 (2012).
17. V. Percario, S. Boncompagni, F. Protasi, et al., *J. Physiol.* **596** (7), 1243 (2018).
18. A. K. Tsaturyan, S. Y. Bershitsky, N. A. Koubassova, et al., *Biophys. J.* **101** (2), 404 (2011).
19. П. В. Кочубей и С. Ю. Бершицкий, *Биофизика* **59** (5), 967 (2014).
20. M. Linari, M. Caremani, C. Piperio, et al., *Biophys. J.* **92** (7), 2476 (2007).
21. G. Wang and M. Kawai, *J. Physiol.* **531** (1), 219 (2001).
22. Z. H. He, R. Bottinelli, M. A. Pellegrino, et al., *Biophys. J.* **79** (2), 945 (2000).
23. R. Rossi, M. Maffei, R. Bottinelli, et al., *J. Appl. Physiol.* **99** (6), 2239 (2005).
24. Д. В. Шепкин, С. Р. Набиев, Н. А. Кубасова и др., *Бюлл. эксперим. биологии и медицины* **169** (3), 310 (2020).
25. N. C. Millar and E. Homsher, *Am. J. Physiol.* **262** (5), C1239 (1992).
26. K. Horiuti, N. Yagi, and S. Takemori, *J. Physiol.* **502** (2), 433 (1997).

Temperature Dependence of Mechanical Characteristics of Demembranized Rabbit Slow Muscle Fibres

S.R. Nabiev*, S.Y. Bershitsky*, A.K. Tsaturyan**, and N.A. Koubassova**

**Institute of Immunology and Physiology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Pervomayskaya ul. 106, Yekaterinburg, 620049 Russia*

***Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, Mitchurinsky prosp. 1, Moscow, 119192 Russia*

We have studied the temperature dependences of the tension and stiffness of actively contracting single fibers from rabbit slow (soleus) muscle using joule temperature jump. We have shown differences in the characteristics between fibers from rabbit fast (psoas) and slow (soleus) muscles, assuming that these differences are due to differences in the kinetics of the myosin head cycle.

Keywords: muscle contraction, isometric tension, temperature jump