

ВЛИЯНИЕ “АКЦЕНТИРОВАННОЙ ЭКСЦЕНТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ” НА ГИПЕРТРОФИЮ И АРХИТЕКТУРУ МЫШЦ

© 2020 г. К. В. Сергеева¹, *, Р. В. Тамбовцева¹

¹*Российский государственный университет физической культуры, спорта,
молодежи и туризма, Москва, Россия*

**E-mail: sergeeva_xenia@mail.ru*

Поступила в редакцию 13.06.2020 г.

После доработки 31.07.2020 г.

Принята к публикации 18.08.2020 г.

Исследование посвящено сравнительному анализу результатов влияния “акцентированной эксцентрической тренировки” и традиционной силовой тренировки на гипертрофию и архитектуру латеральной широкой мышцы бедра (VL). Отличие выбранного протокола силового воздействия от протокола классической силовой тренировки, главным образом, заключалось в использовании супрамаксимальной величины отягощения в эксцентрической фазе движения, то есть величины, превышающий концентрический повторный максимум. При этом объемы тренировочных нагрузок между экспериментальными группами были уравнены. Испытуемые, представители силовых видов спорта, тренировались 2 раза в неделю на протяжении 13 нед. Морфологические и архитектурные параметры мышцы оценивались с помощью магнитно-резонансной томографии и ультрасонографии. Результаты эксперимента показали, что наибольший прирост анатомической площади поперечного сечения (Anatomical Cross Sectional Area ACSA), объема мышцы, угла перистости и физиологической площади поперечного сечения (Physiological Cross Sectional Area, PCSA) VL были получены в группе, применявшей акцентированную эксцентрическую нагрузку. Данный эффект может быть связан с использованием более высокой интенсивности сокращения и, как следствие, большей механической нагрузки, которую испытывали мышцы, что привело к более выраженному адаптивному отклику. Кроме того, показано, что угол перистости и PCSA увеличились в большей степени, чем ACSA и объем мышцы. Наши данные убедительно указывают на тесную связь между углом перистости и мышечной гипертрофией. Увеличение данного параметра, обусловленное пространственными ограничениями в увеличивающейся мышце, может являться надежным показателем оценки степени гипертрофии мышц.

Ключевые слова: гипертрофия, архитектура мышц, угол перистости, эксцентрический режим

DOI: 10.31857/S086981392010009X

Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что высокая интенсивность мышечных сокращений является основной детерминантой гипертрофии мышечной ткани в ответ на выполнение упражнений с отягощениями [1]. В данной связи особого внимания заслуживает эксцентрический режим мышечного сокращения, во время которого мышца может развивать силу в 1.2–1.8 раз превышающую максимальную изометрическую силу [2], растягиваясь под воздействием внешнего отягощения. Данное явление связано с тем, что при активном удлинении

нии основную долю от развиваемых мышцей сил составляют пассивные силы, генерируемые такими упругими элементами, как сеть коллагеновых фибрилл соединительной ткани, окружающей отдельные мышечные волокна, пучки и целую мышцу, а также титиновые нити в саркомерах [3]. Учитывая большие силовые возможности мышц в эксцентрическом режиме сокращения, неудивительно, что уступающая фаза требует активации меньшего совокупного количества волокон или/и работы двигательных единиц (ДЕ) с меньшей частотой разрядов потенциалов действия (ПД), если одинаковая внешняя нагрузка перемещается как во время подъема, так и во время опускания [4]. Поэтому, для того, чтобы уравнять нейромышечную активность – интенсивность сокращения в эксцентрическом режиме должна использоваться большая. На материале спортивных упражнений, в частности, было показано, что разница в максимальной силе между двумя режимами может достигать 160% в некоторых упражнениях [5]. По меньшей мере на 30–60% эксцентрический крутящий момент должен превышать концентрический для достижения сопоставимых значений амплитуды электромиограммы (ЭМГ) [6] или уровня произвольной активации мышц [2].

В предыдущих работах, где сравнивались упражнения, включавшие только максимальные эксцентрические сокращения с упражнениями, включавшими только максимальные концентрические сокращения или же в сравнении с традиционной силовой тренировкой, включающей обе фазы движения [6–10] было показано превосходство первых с точки зрения увеличения мышечной ткани, а также более выраженной гипертрофии быстрых волокон Па и Пх типа [7, 11–15]. Следует отметить, что не во всех подобных исследованиях удалось воспроизвести вышеприведенные результаты и некоторые авторы сообщили об одинаковом изменении анатомической площади поперечного сечения (Anatomical Cross Sectional Area, ACSA) [16] или объема мышц [17, 18]. Причинами противоположного результата данных исследовательских работ может оказаться, во-первых, отсутствие тренировочного стажа у испытуемых; во-вторых, использование недостаточной величины отягощения для эксцентрического режима (разница в величине отягощения между режимами составляла около 20%) [17, 18]; в-третьих, выполнение эксцентрического сокращения с относительно медленной скоростью (2–3 с) [16, 17]. Известно, что для эксцентрического режима зависимость силы тяги мышц от скорости растяжения носит иной характер, чем в концентрическом режиме. Если при концентрическом сокращении, развиваемая сила уменьшается экспоненциально с увеличением скорости сокращения, то при эксцентрическом сокращении, напротив, сила увеличивается с увеличением скорости сокращения [14] по меньшей мере до $\sim 200^\circ \text{ c}^{-1}$ [19]. Действительно, эксцентрическая тренировка, выполняемая с высокой скоростью (180° c^{-1}) увеличивала силу мышц [10, 20] и площадь поперечного сечения [10] в значительной степени больше, чем сопоставимая концентрическая тренировка с высокой или медленной скоростью. Кроме того, использование изокинетического динамометра в вышеуказанных исследованиях [16–18] могло снизить тренировочный эффект. Отмечено, что в отличие от изокинетического эксцентрического сокращения (при постоянной скорости в суставе, которую “контролирует” тренажер) во время изотонического (на практике термин изотонический используется при выполнении концентрического или эксцентрического сокращения, выполняемого с постоянной внешней нагрузкой) эксцентрического сокращения механическая перегрузка, вызванная гравитацией, приводит к большему начальному ускорению движения конечности. Вследствие этого более высокая угловая скорость в начале движения в сочетании с более высоким значением крутящего момента стимулирует гипертрофию мышц в большей степени [21, 22].

Общий вывод, который вырисовывается при анализе фактического материала по данной тематике, сводится к следующему: эксцентрическая тренировка может

оказаться более эффективной, чем концентрическая, в случае обеспечения равнозначного уровня нервномышечной активации для двух режимов, согласно зависимости сила/скорость. С другой стороны, вряд ли правомерно ставить вопрос об абсолютной эффективности того или иного режима. Очевидно, что наиболее рациональный путь повышения эффективности тренировочного воздействия – оптимальное сочетание обоих режимов работы мышц. Одним из способов оптимизации сочетанного применения двух режимов является метод “акцентированной эксцентричной нагрузки”, который предполагает присутствие обеих фаз движения, но в эксцентрической фазе используется супрамаксимальная величина отягощения. Другими словами, используется вес, превышающий концентрический 1ПМ. По нашим сведениям, на данный момент есть только два исследования, изучавших предлагаемый метод с участием лиц, адаптированных к силовым нагрузкам [23, 24]. В обеих работах показано достоверно большее увеличение концентрической [23] и изометрической силы [24] в группе, применявшей акцентированную эксцентрическую нагрузку, по сравнению со стандартной силовой тренировкой, но при этом оба протокола имели аналогичное влияние на ACSA. Тут важно учитывать то обстоятельство, что изменение ACSA, вызванное тренировкой и измеряемой в плоскости перпендикулярной длиннику целой мышцы, не может считаться репрезентативным для оценки изменения физиологической площади поперечного сечения (Physiological Cross Sectional Area, PCSA), которое определяется, как величина площади сечения волокна, перпендикулярная продольной оси отдельных мышечных волокон, умноженная на косинус угла перистости (θ) [25]. В частности, не было обнаружено никакой связи между изменениями площади поперечного сечения одиночного мышечного волокна и ACSA. Поскольку именно PCSA представляет собой общее число саркомеров в мышце, расположенных параллельно и, соответственно, напрямую связана с величиной напряжения, которое может генерировать мышца, то наряду с изучением вызванных тренировкой морфологических изменений мышечного аппарата крайне важно учитывать архитектуру мышцы [25].

Цель настоящего исследования заключалась в сопоставлении влияния высокоинтенсивной силовой тренировки с акцентированной эксцентрической нагрузкой (КОН/ЭКС⁺) с традиционной высокоинтенсивной силовой тренировкой (КОН/ЭКС) на гипертрофию мышц у спортсменов, адаптированных к регулярным тренировкам с отягощениями. Мы предположили, что гипертрофия мышц будет более выражена в КОН/ЭКС⁺ группе, чем в КОН/ЭКС, даже если они будут эквивалентны по объему. Кроме того, ожидалось, что величина вызванного тренировкой увеличения PCSA и угла перистости (архитектурные параметры) будут превышать увеличение ACSA и объема (морфологические параметры). Данное предположение основано на том факте, что при увеличении угла перистости (угла наклона пучков волокон к апоневрозу) возрастает количество сократительной ткани, прикрепленной к данному участку апоневроза, что сопровождается увеличением физиологического поперечника. При этом значение анатомического поперечника может возрасти незначительно.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании приняли участие 30 испытуемых – представители силовых видов спорта (пауэрлифтинг). Средний возраст спортсменов составил 29.0 ± 3.8 лет. Все участники исследования дали добровольное информированное согласие на участие в исследовании согласно этическим стандартам Хельсинской декларации. Участники случайным образом были распределены на три группы: с акцентированной эксцентрической нагрузкой (КОН/ЭКС⁺) ($n = 11$), с традиционной высокоинтенсивной тренировкой (КОН/ЭКС) ($n = 10$) и контрольную группу (КОНТР)

($n = 9$), равные по силовым показателям. В качестве экспериментального упражнения использовался жим ногами (Hammer strength). Испытуемые из экспериментальной (КОН/ЭКС) группы выполняли упражнение с одинаковым внешним отягощением для эксцентрической и концентрической фаз движения стандартным способом, каждой ногой по очереди. Испытуемые из экспериментальной группы (КОН/ЭКС⁺) выполняли концентрическую часть движения двумя ногами, затем одна нога снималась с платформы тренажера и эксцентрическая часть движения выполнялась второй ногой, обеспечивая, таким образом, величину отягощения 140% от концентрического 1ПМ для данной ноги. Затем то же выполнялось для второй ноги. Для обеспечения эквивалентности объема работы для обеих экспериментальных групп, тренировочный объем рассчитывался следующим образом: группа КОН/ЭКС выполняла (7 сетов) \times \times ([~6 концентрических сокращений \times 80% от концентрического 1ПМ] + [~6 эксцентрических сокращений \times 80% от концентрического 1ПМ]); группа КОН/ЭКС⁺ выполняла (5 сетов) \times ([10 концентрических сокращений \times 70% от концентрического 1 ПМ] + [5 эксцентрические сокращения \times 140% от концентрического 1ПМ]). Для обеих групп длительность концентрической части движения составляла 3 с, а эксцентрической – 1 с. Время отдыха между сетами составляло 4 мин. Участники проводили 2 занятия в неделю в течение 13 нед. Оценка 1ПМ проводилась каждые 2 недели и тренировочная нагрузка корректировалась соответствующим образом. Испытуемые из контрольной группы (КОНТР) тренировались по своему традиционному силовому протоколу без наблюдения. У всех участников были проведены тестовые измерения размера мышц и мышечной архитектуры до начала эксперимента и на 13-й неделе экспериментального исследования на 4-й день после заключительной тренировки.

Для исследования архитектуры мышц использовали ультразвуковую (УЗ) визуализацию, посредством которой измеряли угол перистости (θ) и длину пучка (FL) на аппарате Vivid 7 Dimension (Vivid 7 PRO, General Electric, Норвегия) с линейным датчиком 4.9–13.0 МГц. Проводили эхографию латеральной широкой мышцы бедра (VL). Зона расположения датчика для эхолокации – на уровне 50%-ного расстояния между центральной пальпируемой точкой большого вертела и латеральным мышелком бедренной кости правой ноги. Для получения изображений испытуемые лежали на спине с прямыми ногами и расслабленными мышцами. Длина пучка (FL) определялась как расстояние между местом прикрепления волокна у поверхностного апоневроза до места его вхождения в глубокие слои апоневроза. Угол (θ) перистости волокна определялся как угол между пучком волокон и глубоким апоневрозом.

ACSA и объем мышцы определяли по аксиальным МРТ-изображениям (MR-томограф Vantage Atlas, Toshiba, Германия) с использованием T2-импульсной последовательности (TR – 4400.0 мс; TE – 48.0 мс; толщина среза 7 мм). Измерение ACSA латеральной широкой мышцы бедра (VL) проводили путем ручного трассирования окружности мышцы на каждом третьем изображении (т.е. каждые 21 мм) от самого проксимального к самому дистальному изображению, на котором мышца была видима. Значения ACSA для пропущенных изображений оценивали на основе линейной зависимости. Для сравнительного анализа изменений ACSA между группами использовался срез, полученный на уровне 50% длины бедренной кости. Объем мышцы определяли путем суммирования всех значений ACSA, умноженных на толщину среза (7 мм). PCSA вычислялась с помощью уравнения:

$$PCSA = \frac{Vol}{FL \times \cos\theta}$$

где, Vol – объем латеральной головки, FL – длина ее пучка и θ – угол перистости [26].

Статистическая обработка результатов исследования выполнялась при помощи пакета программ Statistica 13.3. Для проверки нормальности распределения выборки использовались тесты Колмогорова–Смирнова (>0.20) и Шапиро–Уилкока (>0.05). Для проверки значимости изменений результатов был проведен двухфакторный дисперсионный анализ с повторениями. Факторы: время (до/после), группа (КОН/ЭКС⁺, КОН/ЭКС, КОНТР). Для выявления значимых различий в результатах между группами были проведены апостериорные тесты с поправкой Бонферрони по факторам время и группа. Для определения межгрупповых различий в относительных изменениях (% Δ) изучаемых параметров был использован парный *t*-критерий Стьюдента. Для всех тестов был установлен уровень значимости $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сводные данные выполненных измерений приведены в табл. 1. 13-недельная тренировочная программа привела к достоверному приросту ACSA в центральной части мышцы. Для изменения ACSA был обнаружен значимый эффект “времени” ($F = 56$; $p < 0.05$; $k = 1$) и взаимодействия “группа \times время” ($F = 20$; $p < 0.05$; $k = 2$). Post-hoc тест выявил статистически значимое увеличение в КОН/ЭКС⁺ группе ($12.2 \pm 8.2\%$; $p < 0.05$) и КОН/ЭКС группе ($5.0 \pm 1.6\%$; $p < 0.05$), но не в группе КОНТР ($0.1 \pm 1.5\%$; $p = 0.65$). Т-тест показал, что относительные изменения в течение исследуемого периода были достоверно больше для КОН/ЭКС⁺ группы ($p = 0.01$), чем для КОН/ЭКС группы.

Изменение объема мышцы имело значимый эффект “времени” ($F = 53$; $p < 0.05$; $k = 1$) и взаимодействия “группа \times время” ($F = 19$; $p < 0.05$; $k = 2$). Post-hoc тест обнаружил значительное увеличение в КОН/ЭКС⁺ группе ($12.4 \pm 8.2\%$; $p < 0.05$) и КОН/ЭКС группе ($5.4 \pm 1.8\%$; $p < 0.05$), но не в группе КОНТР ($0.1 \pm 1.5\%$; $p = 0.81$). Относительные изменения были достоверно больше для КОН/ЭКС⁺ группы ($p < 0.05$), чем для КОН/ЭКС группы.

Для более тщательного изучения динамики мышечной гипертрофии были также получены измерения угла перистости (θ) и PCSA мышцы. Для изменения угла перистости наблюдался значимый эффект “времени” ($F = 224$; $p < 0.05$; $k = 1$). Post-hoc тест выявил увеличение, которое было статистически значимо в КОН/ЭКС⁺ группе ($25.5 \pm 9.6\%$; $p < 0.05$) и в КОН/ЭКС группе ($7.8 \pm 0.9\%$; $p < 0.05$). В группе КОНТР достоверного изменения угла перистости не наблюдалось ($-1.0 \pm 1.8\%$; $p = 0.83$). Т-тест показал, что относительные изменения были достоверно больше для КОН/ЭКС⁺ группы ($p < 0.05$), чем для КОН/ЭКС группы.

Для изменения PCSA обнаружен значимый эффект “времени” ($F = 44$; $p < 0.05$; $k = 1$) и взаимодействия “группа \times время” ($F = 18$; $p < 0.05$; $k = 2$). Только в КОН/ЭКС⁺ группе наблюдалось достоверное увеличение ($15.2 \pm 7.9\%$; $p < 0.05$). При этом в КОН/ЭКС группе ($6.1 \pm 6.2\%$; $p = 0.052$) и в группе КОНТР ($0.1 \pm 1.8\%$; $p = 1.00$) значимых различий не обнаружено. Т-тест показал, что относительные изменения были достоверно больше для КОН/ЭКС⁺ группы ($p < 0.05$), чем для КОН/ЭКС группы.

Для длины пучка (FL) не обнаружено значимого влияния времени ($F = 0.66$; $p = 0.42$; $k = 1$), группы ($F = 0.49$; $p = 0.61$; $k = 2$) или их взаимодействия ($F = 0.42$; $p = 0.66$; $k = 2$), что указывает на отсутствие значимых изменений данного показателя во всех трех группах.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе настоящего исследования было получено несколько важных результатов: 1) даже при равном тренировочном объеме протокол с акцентированной эксцентриской нагрузкой, применяемый в группе КОН/ЭКС⁺ оказался более эффективен в стимуляции гипертрофии исследуемых мышц, чем традиционный высокоинтенсивный протокол, применяемый в группе КОН/ЭКС; 2) показано, что угол перистости волокон (θ) и PCSA увеличились в ходе тренировочного периода в большей степени, чем ACSA и объем мышцы.

Проведенные ранее исследования показали связь между механическим напряжением, развиваемым сократительным аппаратом, и мышечной гипертрофией, определяя механический фактор одним из наиболее важных стимулов роста мышц [27]. Механическое напряжение, передающееся на цитоскелет волокна, может влиять на внутриклеточную сигнализацию и регулировать скорость синтеза белка в мышечной клетке. Основываясь на этих соображениях, в настоящей работе были предприняты попытки потенцирования эффектов силовой тренировки с помощью метода акцентированных супрамаксимальных эксцентриских нагрузок, задача которых – достижение более высокого крутящего момента. Такая организация нагрузки позволяет обеспечить достаточно высокий механический стимул для активации ростовых процессов в мышечных клетках. В настоящем исследовании испытуемые в группе КОН/ЭКС⁺ выполняли эксцентрискую фазу упражнения с интенсивностью 140% от концентрического повторного максимума, т.е., на 60% больше, чем участники из группы КОН/ЭКС. При этом для обеспечения равнозначности тренировочного объема участники из группы КОН/ЭКС выполняли на ~40% больше подходов упражнения. Результаты эксперимента, которые представлены в табл. 1, показали, что прирост ACSA и объема мышц за 13 нед. экспериментального периода составил 12.2% в группе КОН/ЭКС⁺ ($p < 0.05$) и 5% в группе КОН/ЭКС ($p < 0.05$). Полученный прирост в обеих группах согласуется с данными, приведенными другими авторами, где применялись максимальные эксцентриские сокращения [6, 9, 10, 22, 28]. Авторы сообщили о средней гипертрофии мышечной ткани на 3–13% у нетренированных лиц. Учитывая тот факт, что выборку в данном исследовании составили тренированные люди, это дает нам достаточные основания рассматривать полученный прирост как значительный. Положительные результаты настоящей работы мы склонны объяснять такой организацией тренировочного процесса, при которой старались соблюсти все факторы, интенсифицирующие нагрузку, неучтенные в прошлых исследованиях. В отличие от большинства предыдущих работ, посвященных сравнению морфологической адаптации мышц в ответ на эксцентриские или концентрические силовые тренировочные программы, мы ставили своей задачей поиск наиболее оптимального сочетания двух рассматриваемых режимов, применяемых комплексно при силовой подготовке спортсмена. Также, в отличие от предыдущих исследований, использовавших изокинетические динамометры, мы использовали традиционный изотонический тип силовой тренировки. Как уже говорилось выше, изотонические эксцентриские сокращения требуют большей нервно-мышечной активации в начальной фазе движения вследствие более высокой угловой скорости и крутящего момента [21]. Кроме того, рост мышечной массы в настоящем исследовании мог быть интенсифицирован также и относительно высокой скоростью выполнения эксцентриской части движения. Действительно, ранее было показано, что высокоскоростные эксцентриские сокращения способствуют большей гипертрофии мышц по сравнению с медленными эксцентрискими сокращениями [10, 28]. Это говорит о том, что высокая угловая скорость может быть фактором, благоприятствующим

Таблица 1. Среднегрупповые показатели площади поперечного сечения (ACSA), объема, угла перистости (θ), физиологической площади поперечного сечения (PCSA) и длины пучка (FL) латеральной головки четырехглавой мышцы (VL)

Table 1. Average outcome measures of anatomical cross-sectional area (ACSA), volume, pennation angle (θ), physiological cross-sectional area (PCSA) and fascicle length (FL) of the *Vastus lateralis* muscle (VL)

	Группа Group	До Pre-training	После Post-training	$\Delta\%$
ACSA, cm^2 ACSA, cm^2	КОН/ЭКС ⁺ CON/ECC ⁺	34.5 \pm 7.7	38.4 \pm 7.6*	12.2 \pm 8.2†
	КОН/ЭКС CON/ECC	32.3 \pm 6.7	34 \pm 7.1*	5.0 \pm 1.6
	КОНТР CONTR	31.6 \pm 6.4	31.7 \pm 6.5	0.1 \pm 1.5
Объем, cm^3 Volume, cm^3	КОН/ЭКС ⁺ CON/ECC ⁺	747 \pm 164	835 \pm 168*	12.4 \pm 8.2†
	КОН/ЭКС CON/ECC	704 \pm 178	742 \pm 185*	5.4 \pm 1.8
	КОНТР CONTR	692 \pm 109	693 \pm 111	0.1 \pm 1.5
θ , град θ , deg	КОН/ЭКС ⁺ CON/ECC ⁺	19.9 \pm 3.4°	24.8 \pm 3.6°*	25.5 \pm 9.6°†
	ЭКС/КОН CON/ECC	20.1 \pm 2.6°	21.7 \pm 2.7°*	7.8 \pm 0.9°
	КОНТР CONTR	17.9 \pm 1.7°	17.7 \pm 1.7°	-1.0 \pm 1.8°
PCSA, cm^2 PCSA, cm^2	КОН/ЭКС ⁺ CON/ECC ⁺	124 \pm 20	143 \pm 24*	15.2 \pm 7.9†
	КОН/ЭКС CON/ECC	123 \pm 33	130 \pm 33	6.1 \pm 6.2
	КОНТР CONTR	121 \pm 28	121 \pm 27	0.1 \pm 1.8
FL, мм FL, mm	КОН/ЭКС ⁺ CON/ECC ⁺	60.3 \pm 0.7	60.4 \pm 0.6	1.1 \pm 2.1
	КОН/ЭКС CON/ECC	60.1 \pm 1.7	60.2 \pm 0.7	0.7 \pm 4.1
	КОНТР CONTR	65.1 \pm 0.6	65.1 \pm 0.6	-0.1 \pm 2.4

Значения представлены как среднее \pm σ . * – $p < 0.05$ – достоверность различий между величинами до и после. † – $p < 0.05$ – достоверно отличается от КОН/ЭКС и КОНТР групп.

Values are means \pm σ . * – $p < 0.05$ – significantly different from pre values. † – $p < 0.05$ – significantly different from CON/ECC and CONTR.

синтезу белка. Все эти факторы в совокупности позволили участникам из КОН/ЭКС⁺ группы добиваться более высоких темпов прироста мышечной ткани.

Наряду с морфологическими параметрами скелетной мышцы, не менее важным детерминантом функциональных характеристик мышцы является ее внутренняя архитектура, то есть, физическое расположение пучков и волокон. Мы наблюдали значительно большее увеличение угла перистости в группе КОН/ЭКС⁺ (25.5%, $p < 0.05$) по сравнению с участниками из группы КОН/ЭКС (7.8%; $p < 0.05$), что абсолютно закономерно привело к увеличению PCSA. Между размером мышц и углом перистости существует сильная положительная зависимость. Параллельное добавление саркомеров приводит к увеличению диаметра волокон, что, в свою очередь, приводит к увеличению угла наклона мышечных пучков по отношению к оси мышцы для более плотной упаковки волокон. Следствием данных архитектурных адаптаций является увеличение физиологического поперечника. Предыдущие исследования, изучавшие четырехглавую мышцу бедра человека с помощью комбинированной биопсии мышц и макроскопических методов визуализации мышц (МРТ, КТ) показали, что увеличение площади поперечного сечения волокна превосходит ACSA в ответ на силовую тренировку [29, 30]. В целом наши данные убедительно свидетельствуют о том, что угол перистости непрерывно увеличивается, по крайней мере, в течение первых нескольких месяцев тренировок, причем, увеличение архитектурных показателей опережает рост морфологических.

Таким образом, полученные данные подтвердили гипотезу о том, что выполнение тренировочных упражнений с акцентированной эксцентрической нагрузкой приводит к более значительному увеличению показателей мышечной гипертрофии в сравнении с традиционными силовыми тренировками. Внедрение эксцентрических нагрузок с супрамаксимальными отягощениями в тренировочные программы может способствовать стабильному накоплению миофибриллярных белков, что закономерно приведет к повышению скоростно-силовых показателей и росту результатов в соревновательных упражнениях. Показано также, что использованные в настоящей работе показатели архитектурного анализа мышечного аппарата дополняют данные морфологического анализа и создают целостное представление о степени гипертрофии мышц. Необходимо отметить, что при планировании длительной тренировочной программы с использованием данной тренировочной модели следует соблюдать осторожность, поскольку риск травмы может быть выше, чем при традиционной силовой тренировке с отягощениями.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Авторы сообщают, что не получали никакого финансирования и все затраты на исследование были личными вкладами авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fry A.C. The role of resistance exercise intensity on muscle fibre adaptations. *Sports Med.* 34(10): 663–679. 2004.
2. Hahn D. Stretching the limits of maximal voluntary eccentric force production *in vivo*. *J. Sport Health Sci.* 7(3): 275–281. 2018.
3. Herzog W., Schappacher G., DuVall M., Leonard T.R., Herzog G.A. Residual force enhancement following eccentric contractions: a new mechanism involving titin. *Physiology.* 31(4): 300–312. 2016.
4. Hoppeler H. Moderate Load Eccentric Exercise; A Distinct Novel Training Modality. *Front. Physiol.* 7(483): 1–12. 2016.
5. Hollander D.B., Kraemer R.R., Kilpatric M.W., Ramadan Z.G., Reeves G.V., Francois M., Hebert E.P., Tryniecki J.L. Maximal eccentric and concentric strength discrepancies between young men and women for dynamic resistance exercise. *J. Strength Cond. Res.* 21(1): 34–40. 2007.

6. Maeo S., Shan X., Otsuka S., Kanehisa H., Kawakami Y. Neuromuscular Adaptations to Work-matched Maximal Eccentric versus Concentric Training. *Med. Sci. Sports Exerc.* 50(8): 1629–1640. 2018.
7. Vikne H., Refsnes P.E., Ekmark M., Medbo J.I., Gundersen V., Gundersen K. Muscular performance after concentric and eccentric exercise in trained men. *Med. Sci. Sports Exerc.* 38(10): 1770–1781. 2006.
8. Roig M., O'Brien K., Kirk G., Murray R., McKinnon P., Shadgan B., Reid W.D. The effects of eccentric versus concentric resistance training on muscle strength and mass in healthy adult subjects: a systematic review with meta-analysis. *Br. J. Sports Med.* 43(8): 556–568. 2009.
9. Seger J.Y., Arvidsson B., Thorstensson A. Specific effects of eccentric and concentric training on muscle strength and morphology in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.* 79(1): 49–57. 1998.
10. Farthing J.P., Chilibeck P.D. The effects of eccentric and concentric training at different velocities on muscle hypertrophy. *Eur. J. Appl. Physiol.* 89(6): 578–586. 2003.
11. Friedmann-Bette B., Bauer T., Kinscherf R., Vorwald S., Klute K., Bischoff D., Müller H., Weber M., Metz J., Kauczor H., Bärtsch P., Billeter R. Effects of strength training with eccentric overload on muscle adaptation in male athletes. *Eur. J. Appl. Physiol.* 108(4): 821–836. 2010.
12. Hortobágyi T., Hill J.P., Houmard J.A., Fraser D.D., Lambert N.J., Israel R.G. Adaptive responses to muscle lengthening and shortening in humans. *J. Appl. Physiol.* 80(3): 765–772. 1996.
13. Hortobágyi T., Dempsey L., Fraser D., Zheng D., Hamilton G., Lambert J., Dohm L. Changes in muscle strength, muscle fibre size and myofibrillar gene expression after immobilization and retraining in humans. *J. Physiol.* 524(Pt1): 293–304. 2000.
14. Paddon-Jones D., Leveritt M., Lonergan A., Abnerthy P. Adaptation to chronic eccentric exercise in humans: the influence of contraction velocity. *Eur. J. Appl. Physiol.* 85(5): 466–471. 2001.
15. Friedmann B., Kinscherf R., Vorwald S., Müller H., Kucera K., Borisch S., Richter G., Bartsch P., Billeter R. Muscular adaptations to computerguided strength training with eccentric overload. *Acta Physiol Scand.* 182(1): 77–88. 2004.
16. Moore D.R., Young M., Phillips S.M. Similar increases in muscle size and strength in young men after training with maximal shortening or lengthening contractions when matched for total work. *Eur. J. Appl. Physiol.* 112(4): 1587–1592. 2012.
17. Franchi M.V., Atherton P.J., Reeves N.D., Flück M., Williams J., Mitchell W.K., Selby A., Beltrán-Valls R.M., Narici M.V. Architectural, functional and molecular responses to concentric and eccentric loading in human skeletal muscle. *Acta Physiol. (Oxf).* 210(3): 642–654. 2014.
18. Unlu G., Cevikol C., Melekoglu T. Comparison of the effects of eccentric, concentric, and eccentric-concentric isotonic resistance training at two velocities on strength and muscle hypertrophy. *J. Strength Cond. Res.* 34(2): 337–344. 2019.
19. Pain M.T., Young F., Kim J., Forrester S.E. The torque-velocity relationship in large human muscles: maximum voluntary versus electrically stimulated behaviour. *J. Biomech.* 46(4): 645–650. 2013.
20. Norrbrand L., Fluckey J.D., Pozzo M., Tesch P.A. Resistance training using eccentric overload induces early adaptations in skeletal muscle size. *Eur. J. Appl. Physiol.* 102(3): 271–281. 2008.
21. Guilhem G., Cornu C., Maffiuletti N.A., Guével A. Neuromuscular adaptations to isoload versus isokinetic eccentric resistance training. *Med. Sci. Sports Exerc.* 45(2): 326–335. 2013.
22. Guilhem G., Cornu C., Guével A. Neuromuscular and muscle-tendon system adaptations to isotonic and isokinetic eccentric exercise. *Ann. Phys. Rehabil. Med.* 53(5): 319–341. 2010.
23. Brandenburg J.P., Docherty D.J. The effects of accentuated eccentric loading on strength, muscle hypertrophy, and neural adaptations in trained individuals. *Strength Cond. Res.* 16(1): 25–32. 2002.
24. Walker S., Blazevich A.J., Haff G.G., Tufano J.J., Newton R.U., Häkkinen K. Greater strength gains after training with accentuated eccentric than traditional isoinertial loads in already strength-trained men. *Front. Physiol.* 7:149–161. 2016.
25. Aagaard P., Andersen J.L., Dyhre-Poulsen P., Leffers A.M., Wagner A., Magnusson S.P., Halkjær-Kristensen J., Simonsen E.B. A mechanism for increased contractile strength of human pennate muscle in response to strength training: changes in muscle architecture. *J. Physiol.* 534(Pt 2): 613–623. 2001.
26. Massey G., Evangelidis P., Folland J. Influence of contractile force on the architecture and morphology of the quadriceps femoris. *Exp. Physiol.* 100(11): 1342–1351. 2015.
27. Hessel A.L., Lindstedt S.L., Nishikawa K.C. Physiological mechanisms of eccentric contraction and its applications: a role for the giant titin protein. *Front. Physiol.* 8(8): 1–10. 2017.
28. Shepstone T.N., Tang J.E., Dallaire S., Schuenke M.D., Staron R.S., Phillips S.M. Short-term high- vs. low-velocity isokinetic lengthening training results in greater hypertrophy of the elbow flexors in young men. *J. Appl. Physiol.* 98(5): 1768–1776. 2005.
29. Esmarck B., Andersen J.L., Olsen S., Richter E.A., Mizuno M., Kjaer M. Timing of postexercise protein intake is important for muscle hypertrophy with resistance training in elderly humans. *J. Physiol.* 535(Pt 1): 301–311. 2001.
30. Häkkinen K., Newton R.U., Gordon S.E., McCormick M., Volek J.S., Nindl B.C., Gotschalk L.A., Campbell W.W., Evans W.J., Häkkinen A., Humphries B.J., Kraemer W.J. Changes in muscle morphology, electromyographic activity, and force production characteristics during progressive strength training in young and older men. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* 53(6): 415–423. 1998.

Effect of Accentuated Eccentric Loading on Muscle Hypertrophy and Architecture**K. V. Sergeeva^{a,*} and R. V. Tambovtseva^a**^a*Russian State University of Physical Culture, Sports, Youth and Tourism (GTSOLIFK), Moscow, Russia***e-mail: sergeeva_xenia@mail.ru*

The purpose of this study was to determine the effects of accentuated eccentric loading vs. traditional strength training on hypertrophy and architecture of *vastus lateralis* muscle (VL). The main difference between the chosen strength protocol from the conventional strength training protocol that it applies a supramaximal external load during the eccentric phase of the lift, that is, the value exceeding the concentric repetition maximum. The training volume between the experimental groups was equalized. Volunteers that were engaged in strength sports trained two times a week for 13 weeks. Morphological and architectural parameters of the muscles were evaluated using magnetic resonance imaging and ultrasonography. The results of the experiment showed that the most significant increase in anatomical cross-sectional area (ACSA), muscle volume, pennation angle, and physiological cross-sectional area (PCSA) of VL were obtained in the group using an accentuated eccentric loading. This effect can be associated with the use of higher intensity and as a consequence of the greater mechanical strain applied to the muscle, which caused a more pronounced adaptive response. Besides, it was shown that the pennation angle and PCSA increased to a greater extent than ACSA and muscle volume. Our data strongly suggest a close relationship between the pennation angle and muscular hypertrophy. An increase in this parameter that might be driven by space constraints in the hypertrophying muscle can be a reliable indicator of the degree of muscle hypertrophy.

Keywords: hypertrophy, muscle architecture, pennation angle, eccentric contraction

ЦИТИРОВАТЬ:

Сергеева К.В., Тамбовцева Р.В. Влияние “акцентированной эксцентрической нагрузки” на гипертрофию и архитектуру мышц. Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 106(10): 1302–1311. DOI: 10.31857/S086981392010009X

TO CITE THIS ARTICLE:

Sergeeva K.V., Tambovtseva R.V. Effect of Accentuated Eccentric Loading on Muscle Hypertrophy and Architecture. Russian Journal of Physiology. 106(10): 1302–1311.

DOI: 10.31857/S086981392010009X