

Wernbom, M, Järrebring, R, Andreasson, MA, and Augustsson, J. Acute effects of blood flow restriction on muscle activity and endurance during fatiguing dynamic knee extensions at low load. J Strength Cond Res 23(8): 2389-2395, 2009

Срочные эффекты ограничения кровотока на мышечную активность и выносливость в ходе изнурительных динамических разгибаний в коленном суставе при низкой нагрузке

Abstract

Цель данного исследования заключалась в изучении мышечной активности и выносливости во время изнурительных динамических упражнений по разгибанию в коленном суставе (КС) с низкой интенсивностью с / и без ограничения кровотока. Одиннадцать здоровых испытуемых с опытом силовых тренировок осуществляли по 3 сета односторонних разгибаний в КС без отдыха между повторениями, до концентрического отказа с отягощением в 30% от максимума. Одна нога случайно выбиралась для тренировок с бароманжетой (ишемией), а другая нога тренировалась без ишемии. Мышечная активность четырехглавой мышцы бедра регистрировалась при помощи ЭМГ. Были проанализированы параметры воспринимаемой нагрузки (RPE) и показатели острых и запаздывающих болезненных ощущений (DOMS) до и после 24, 48 и 72 часов после упражнения. Результаты показали высокий уровень ЭМГ в условиях обоих экспериментов, но не было никаких существенных различий в отношении максимальной мышечной активности, за исключением более высокого уровня ЭМГ в эксцентрической фазе в третьем сете при тренировке без ишемии ($p = 0.005$). В каждом сете было выполнено достоверно больше повторений ногой, которая не была ишемизирована ($p < 0,05$). RPE и показатели острых болезненных ощущений были идентичны, но уровень DOMS был выше в неишемизированной ноге ($p < 0,05$). Мы при-

шли к выводу, что ограничение кровотока при низкой интенсивности динамического разгибания в КС уменьшает выносливость, но не увеличивает максимальную активность мышц по сравнению с тренировкой без ишемии, когда оба режима выполняются до отказа. Высокие уровни мышечной активности означают, что выполнение динамических разгибаний в КС с низкой нагрузкой без отдыха может быть полезным методом при назначении реабилитации колена, когда большие усилия противопоказаны. Однако ограничение кровотока сопровождается острой ишемической болью в мышцах, поэтому применение этого метода может применяться только высокомотивированными лицами.

Ключевые слова: силовая тренировка, ишемия, мышцы, окклюзия, кровоток, упражнения с ограничением кровотока, мышечная гипертрофия, активность мышц.

Введение

В последние 8-10 лет тренировка с низким уровнем нагрузки и ограничением кровотока привлекла значительное внимание - и как возможная замена упражнению с большими отягощениями в реабилитации, а также как способ увеличить в ходе тренировок объем мышц и их силу у здоровых людей. Многочисленные исследования показали, что ограничение кровотока посредством бароманжеты в комбинации с силовыми упражнениями низкой интенсивности (то есть с небольшими отягощениями) способствует увеличению мышечной массы на том же уровне, что и при стандартных силовых тренировках (17, 26-28), а иногда даже больше, чем стандартные тренировки (2,12). В исследованиях, включавших контрольные группы, которые тренировались с одинаковой интенсивно-

стью и в одинаковом объеме, но без бароманжеты, обычно показывали небольшой прирост в объеме и силе мышц (1, 2, 12, 27, 18).

Однако, поскольку ишемия снижает выносливость мышц при нагрузках от низких до умеренных, обычно используемых в тренировках с окклюзией (33), и потому, что, как правило, ишемия применяется постоянно (в том числе в периоды отдыха) в течение тренировки, усилия, необходимые для завершения данного объема работы в тренировке, должны быть существенно меньше, чем в условиях свободного движения (без ограничения кровотока). Таким образом, можно утверждать, что предыдущие исследования не контролировали степень напряжения (усилия) при сравнении тренировок с бароманжетой и без нее. Более того, сообщалось, что не было больших различий в оценке острых болезненных ощущений с ишемией и без нее, когда динамические разгибания в КС выполнялись в непрерывной безостановочной манере "до отказа", указывая на то, что ишемические состояния были вызваны самой тренировкой (33). Следовательно, целью настоящего исследования, было изучение есть ли различия в мышечной активности, измеренной посредством электромиографии (ЭМГ) и выносливости при выполнении разгибания в коленном суставе с небольшими отягощениями с ишемией и без нее.

Методы

[Экспериментальный подход к проблеме](#)

Для изучения влияния ограничения кровотока на мышечную активность и выносливость во время динамических разгибаний в КС было использован метод, при котором участники эксперимента одной ногой выполняли упражнение с бароманжетой, а другой ногой – без бароманжеты. Случайным образом определялась нога, которая будет использоваться с бароманжетой. Все исследуемые были протестированы на макси-

мальное значение отягощения (1RM), максимальное изометрическое напряжение (оценивалась нормализованная ЭМГ) и динамическое разгибание в КС в сочетании с ишемией за одну неделю до начала основного эксперимента. Была выполнена нормировка амплитуды ЭМГ по отношению к ЭМГ, полученной при максимальной изометрической активации мышцы, чтобы получить индекс уровня нервно-мышечной активации во время упражнений, а также потому, что эта процедура повышает надежность измерений (4).

Исследуемые

Одиннадцать здоровых субъектов (8 мужчин и 3 женщины, в возрасте 20-39 лет) участвовали добровольцами в исследовании (таблица 1).

Таблица 1. Характеристика исследуемых

	n	Среднее	Стандартное отклонение
Мужчины	8		
Женщины	3		
Возраст, лет		25	5
Рост, см		178	10
Вес, кг		77	13

Все участники имели несколько лет опыта силовых тренировок. Некоторые из исследуемых были легкоатлетами (спринтерами и прыгунами) и футболистами, а остальные тренировались в области фитнеса, но ни один не выступал в соревнованиях по силовым видам спорта. Таким образом субъектов можно классифицировать как «тренированные» в общей совокупности между нетренированными и элитой как это изложено Deschen & Kraemer (10), и они были протестированы в начале нового тренировочного цикла. Участникам эксперимента было дано указание не выполнять упражнения на четырехглавую мышцу бедра в течение последних 3-х дней до начала основного теста. Субъекты были инфор-

мированы об экспериментальных рисках и подписали документ о согласии участвовать в экспериментах. Исследование было одобрено Комитетом по этике человека Медицинского факультета Университета Гетеборга, Швеция.

Процедуры

Тестирование силы и ознакомительные процедуры. За неделю до основного испытания, у участников эксперимента определялось максимальное значение силы для каждой ноги при выполнении разгибания в коленном суставе на силовом тренажере (FL130, Серия соревновательная, Borgas, Швеция). Только одна тренировка была ознакомительной, поскольку все участники были знакомы с упражнением в динамическом разгибании в КС. Максимальная сила разгибания в КС определялась в соответствии с процедурой, описанной Staron et al. (22). После определения максимальных возможностей, участники эксперимента практиковали развивать максимум изометрических усилий при разгибании ноги, с рычагами тренажера фиксированными под углом, соответствующим 70 град сгибания в коленном суставе (полное разгибание ноги в КС принималось за ноль). Через 5 минут отдыха, определялась нагрузка в 30% от максимума, после чего участники эксперимента были ознакомлены с процедурой тренировок, при которой будет осуществляться частичная ишемия одной из конечностей. Бароманжета шириной 135 мм в ширину с широким пневматическим мешком 100 мм внутри была подключена к хирургической системе (Zimmer A.T.S. 2000, Zimmer Patient Care, Dover, Огайо, USA) с автоматическим регулированием давления. Манжета была обернута вокруг проксимальной части бедра. Перед тренировкой с частичной окклюзией в манжете было давление 100 мм ртутного столба и это давление сохранялось в манжете в течение периода отдыха между сетами. Для каждой ноги, выполнялся один сет разгибаний в коленном

суставе до концентрического отказа, затем через 45 секунд отдыха выполняли второй сет с 5 повторениями, при этом поддерживалась частичная окклюзия. Это было сделано для того, чтобы выяснить, как испытуемые переносят давление бароманжеты, которое будет применяться во время основного эксперимента через неделю.

Тест на выносливость. Через 6-10 дней после тестирования максимальной силы, участники эксперимента тестировались на выносливость в разгибании колена одной ноги с отягощением в 30% от максимума. Использовалась та же бароманжета, что и при ознакомительном тесте, давление в бароманжете было равно 100мм р.с. непосредственно перед упражнением и это давление поддерживалось в манжете в течение всего упражнения, в том числе и во время отдыха между подходами. После разминки, испытуемые делали столько повторений, как только могли в 3 сетах на каждую ногу. Отдых между сетами составлял 45 секунд как для ноги с бароманжетой, так и для ноги без бароманжеты. Диапазон движения составил от 100 град до 20 град сгибания в КС (0 град= полное разгибание ноги в КС), а частота составляла 20 повторений в минуту (по 1,5 сек. на концентрический и эксцентрический режим) и контролировалась метрономом, установленным на 40 ударов в минуту. Никакого отдыха между повторениями не допускалось и испытуемые должны были заканчивать эксцентричную фазу до того, как противовес опустится полностью чтобы избежать расслабления четырехглавой мышцы. Количество повторений в каждом сете обозначалось как степень выносливости, а мышечная активность во время упражнения измерялась посредством ЭМГ как описывается ниже. После завершения всех трех сетов с ноги снимали манжету. Испытуемые продолжали сидеть в тренажере во время отдыха между подходами. Предпочтение продолжительной ча-

стичной окклюзии по сравнению с сильной, но прерывистой было отдалено потому, что в большинстве предыдущих исследований использовали частичную окклюзию, а также потому, что частичная окклюзия кровяного потока более приемлема, чем сильная или полная окклюзия. Ноeger et al. (15) установили достоверную зависимость (коэффициент корреляции от 0,86 до 0,96) для тестов на выносливость при разгибании ноги в КС с нагрузками в 40% от максимума и 60% от максимума, если тесты проводились в схожих по продолжительности условиях, что и в данном исследовании. Tagesson and Kvist (23) оценили надежность теста на разгибание в КС с максимальным отягощением. Установлена высокая надежность этого теста (коэффициент корреляции составил от 0,90 до 0,96).

Электромиография и гониометрия. До размещения электродов следует побрить кожные покровы на месте их расположения и затем тщательно обработать поверхность этанолом. Биполярные электроды имеющие самоклеящиеся поверхности Ag / AgCl (модель 2223, 3M Medical, Neuss, Germany) были размещены на латеральной (VL) и на медиальной (VM) головках квадрицепса бедра на расстоянии 4,0 см друг от друга, примерно на 10-15 см выше проксимального края надколенника. Такое размещение электродов схоже с используемым Andersen et al (4). Оно было выбрано так, чтобы избежать прохождения электродов над зоной иннервации мышц во время выполнения упражнения, оставляя достаточно пространства для бароманжеты. Руководство по анатомии Rainoldi et al. (20) было взято за основу при определении примерного прохождения зон иннервации. Угол сгибания коленного сустава был измерен с помощью электрогониометра, который был расположен сбоку от коленного сустава. Калибровку сигнала гониометра проводили в анатомическом

положении коленного сустава с углами сгибания 0 и 90, используя геометрический транспортир. Для измерения положения и смещения стека применялся линейный датчик. Данные гониометра и линейного датчика были использованы для определения концентрической и эксцентрической фазы каждого повторения. Данные ЭМГ и гониометра / линейного датчика были собраны с помощью системы сбора и записи MuscleLab 3010e (Ergotest Technology, Langesund, Norway), и обрабатывались с помощью прилагаемого программного обеспечения на ноутбуке (3). ЭМГ-сигнал в системе MuscleLab проводился через встроенные предусилители, и затем предварительно усиленный сигнал фильтровался через полосовой фильтр от 8 до 1200 Гц, прежде чем он проводился через среднеквадратический (RMS) преобразователь. RMS преобразованный сигнал брался при частоте 100 Гц для синхронизации с другими подключенными устройствами. ЭМГ нормализовалась при сравнении с ЭМГ при максимальном изометрическом напряжении мышцы (NVIA), используя функцию нормализации в системе MuscleLab. После разминки выполнялись две попытки измерения NVIA, при этом угол в КС составлял 70 град. Участникам эксперимента давалась инструкция развивать силу без рывков, и когда она достигала максимума, это состояние сохранялось по крайней мере 3-4 сек для того, чтобы была собрана информация ЭМГ для нормализации. Alkner et al. (3) сообщал о коэффициенте вариации между попытками ЭМГ в 4,7-9,2% для системы MuscleLab.

Дисплей с кривой ЭМГ RMS был помещен перед участниками эксперимента при выполнении ими упражнений с целью мониторинга и для обеспечения обратной связи в режиме реального времени. Поскольку уровень нормализации выбирался автоматически MuscleLab, первая из 2-х попыток MVIA сохранялась и использовалась в качестве основного значения (100%), если 2 попытки не отличались более чем на 5% по

амплитуде RMS. В в этом случае дальнейшие попытки не выполнялись. При тестировании выносливости с отягощением в 30% от максимума с окклюзией и без нее, как и в MVIA испытаниях, ЭМГ-кривая RMS была показана в реальном времени перед исследуемым для мотивации. Участники эксперимента также поддерживались для мотивации громкими словами и поощрениями с целью того, чтобы они выполняли тест до концентрического отказа. Средние значения RMS для концентрических и эксцентрических фаз движения, соответственно, были использованы для анализа. Первое повторение каждого сета не анализировали, потому что участники эксперимента, как правило, не поддерживали необходимый тем движений. В течение последних 2-х или 3-х повторений в каждом сете, большинство участников эксперимента также имели трудности для поддержания необходимого темпа из-за накопленного утомления, но эти повторения были проанализированы до тех пор, пока сохранялся полный диапазон движения.

Оценки боли, воспринимаемого напряжения и запаздывающих болезненных ощущений

В конце тренировки, выполняемой с окклюзией и без нее, исследуемые были опрошены. Они оценивали свои ощущения по 10-балльной шкале Борга. Кроме того они оценивали воспринимаемое напряжение (RPE). В соответствии с рекомендациями Борга (6), максимальные значения по шкале Борга соответствовали боли в четырехглавой мышце такой силы, больше которой они никогда еще не испытывали при выполнении упражнений. Исследуемым разрешалось использовать даже 12 балльную шкалу, если они думали, что боль превышала максимальные значения. Запаздывающие болевые ощущения (DOMS) оценивались через 24, 48 и 72 часа после эксперимента с использованием визуальной аналого-

вой шкалы (VAS). Нулевое значение по шкале (VAS) означало отсутствие болезненности вообще, а максимальное значение (10) означало экстремальную болезненность мышц (33).

Статистический Анализ

Анализ данных экспериментальных исследований показал, что, чтобы выявить 33% различий в количестве повторений в первом сете по меньшей мере потребовалось бы 7 участников чтобы достичь достоверности различий в 0,90. Для оценки достоверности различий в уровне ЭМГ использовали t-критерий Стьюдента. Для оценки достоверности различий в уровне болезненных ощущений и RPE использовали ранговый критерий Вилкоксона. Среднее арифметическое и стандартное отклонение рассчитывались для данных ЭМГ и количества повторений. Для данных, полученных по шкале Борге рассчитывались медиана и межквартильный размах. Для обработки данных использовался статистический пакет SPSS версии 14. Критическим уровнем значимости принималось значение $p \leq 0,05$.

Результаты

Получены достоверно различающиеся результаты в количестве повторений, между ногой, выполняющей движение в манжете и без манжеты. Различие результатов достоверно в каждом сете (рис.1). Не установлены различия в минимуме и максимуме электрической активности между ногой с манжетой и без манжеты. Исключение составляет третий сет, в котором активность мышцы в эксцентрическую фазу с максимальной активностью была достоверно выше в ноге без бароманжеты ($p=0,005$ для широкой латеральной и широкой медиальной мышц (табл.2). Острая боль и уровень RPE не различались между ногами с манжетой и без.

Запаздывающие болезненные ощущения по шкале VAS были достоверно выше в ноге без манжеты ($p < 0,05$), табл.3.

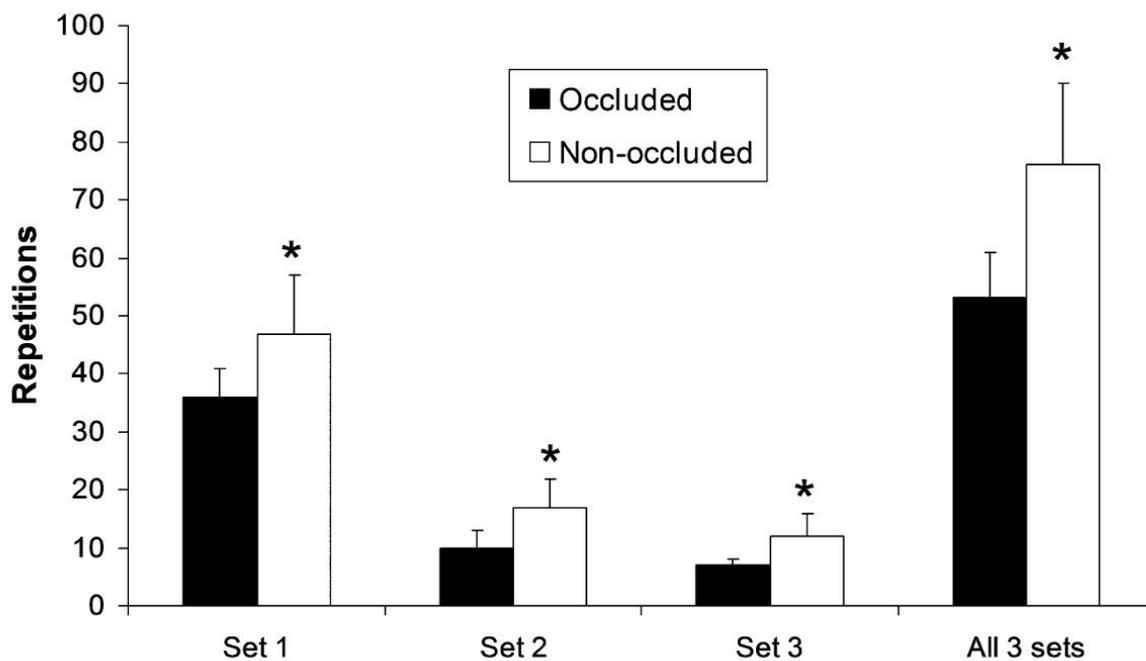


Рисунок 1. Количество повторений без окклюзии и с окклюзией. * - различия достоверны при $p < 0,05$ между состоянием окклюзии и без окклюзии

Таблица 2. Самая низкая и самая высокая электромиографическая (ЭМГ) активность (% от максимальной изометрической активации) для полных концентрической и эксцентрической фаз для широкой медиальной (VM) и латеральной широкой мышцы бедра (VL) во время состояния окклюзии и без окклюзии, в 1, 2 и 3 сетях (среднее значение и стандартное отклонение).

Мышцы	ЭМГ в концентрическую фазу (% от MVIA)				ЭМГ в эксцентрическую фазу (% от MVIA)			
	min	max	min	max	min	max	min	max
	1 сет окклюзия		1 сет без окклюзии		1 сет окклюзия		1 сет без окклюзии	
VM	34±10	101±22	37±12	107±24	24±8	50±13	26±8	57±18
VL	36±11	86±19	34±11	97±17	23±7	45±10	23±7	44±12
VM+VL	35±10	94±18	36±11	102±19	24±7	48±10	24±7	50±14
	2 сет окклюзия		2 сет без окклюзии		2 сет окклюзия		2 сет без окклюзии	
VM	73±18	98±27	72±22	107±27	29±9	52±16	32±9	61±16
VL	66±19	91±26	63±19	96±20	26±9	46±12	28±10	53±15
VM+VL	70±18	94±23	68±20	102±21	28±8	49±13	30±9	57±15
	3 сет окклюзия		3 сет без окклюзии		3 сет окклюзия		3 сет без окклюзии	
VM	77±21	93±23	78±21	102±20	34±11	47±12	37±12	64±17*
VL	70±19	85±24	67±19	93±24	31±10	40±11	33±13	53±15*
VM+VL	74±19	89±21	72±20	98±20	32±10	44±11	35±12	28±15*

* $p < 0,05$ между состоянием с окклюзией и без окклюзии; $n = 11$.

Таблица 3. Медиана и межквартильный размах для локального восприятия напряжения (RPE) – шкала от 6 до 20, боли (Borg CR-10) и запаздывающих болезненных ощущений (DOMS, визуальный аналог шкалы от 0 до 10 баллов)

Переменные	С окклюзией	Без окклюзии
Borg RPE	18,9 (1,3)	19,0 (1,2)
CR-10	9,7 (2,1)	9,2 (1,5)
DOMS (через 24 часа)	2,9 (2,8)	4,0 (2,0)*
DOMS (через 48 часов)	3,3 (2,8)	5,0 (2,5)*
DOMS (через 72 часа)	2,5 (2,4)	3,5 (4,1)*

* $p < 0,05$ между состоянием с окклюзией и без окклюзии; $n = 11$.

Обсуждение

Основным выводом данного исследования являлось то, что, хотя частичное ограничение потока крови с помощью набедренной бароманжеты влияло на выносливость при выполнении упражнений на динамическое разгибание в КС при отягощении в 30% от максимума, оно не повышало уровень максимальной мышечной активности четырехглавой мышцы бедра при концентрической (*укорочение мышцы*) или эксцентрической (*удлинение мышцы*) фазе по сравнению с упражнениями без манжеты, когда они выполняются до концентрического отказа. Во всяком случае, имеются предпосылки для большей активности широкой мышцы бедра без бароманжеты как для концентрической, так и для эксцентрической фазы, что становится существенным для эксцентрической фазы в третьем сете. В общем, наименьшая мышечная активность наблюдалась в начале сета, а наибольшей была при последних повторениях каждого сета, и это наблюдалось и в концентрической и в эксцентрической фазах упражнения. Также отмечено, что мышечная активность первых повторений в подходах, особенно в концентрических фазах, была явно выше при втором и третьем подходах по сравнению с повторениями в первом подходе.

На первый взгляд может показаться, что наши данные противоречат предыдущим исследованиям, в которых сравнивали мышечную активность при выполнении тренировок с бароманжетой и без нее, которые демонстрировали большую мышечную активность при тренировках с бароманжетой. Но в этих исследованиях (25, 26, 34, 35) степень прилагаемых усилий была явно разной при разных состояниях, в то время как в данном исследовании усилие было максимальным при обоих состояниях (с манжетой и без). Более того, в настоящем исследовании

при обоих состояниях в нескольких последних повторениях во время концентрических фаз наблюдались высокие уровни мышечной активности (86-107% MVIA), кроме того, наблюдалось небольшое краткосрочное увеличение (в течение нескольких десятых секунды) уровня мышечной активности до 120-160% MVIA. Поэтому, наши результаты подтверждают вывод Takarada et al. (25, 27) о высоких уровнях ЭМГ при низкоинтенсивных (20-40% от максимума) тренировках с бароманжетой для ограничения потока крови. Новым в нашем исследовании является то, что высокая активность мышц возможна также и без бароманжеты, если повторения выполняются до концентрического отказа.

Высокие уровни ЭМГ предполагают, но напрямую не доказывают рекрутирование мышечных волокон типа II. Тем не менее, Krusturp et al. (16) недавно продемонстрировали, что ограничение кровотока во время концентрического разгибания в КС при низкой рабочей нагрузке (29 Вт) приводит к пониженному содержанию креатинфосфата в 93% быстро сокращающихся волокон. Эти факты свидетельствуют о том, что большинство мышечных волокон типа II могут быть рекрутированы и при низких нагрузках во время ишемии. Хорошо известно, что кровоток в мышцах во время статических и динамических упражнений происходит в основном в период расслабления между сокращениями (5, 18). Исключив расслабление мышц между повторениями в нашем протоколе тренировки, кровоток в мышцах, вероятно, стал недостаточен для удовлетворения метаболических потребностей, и, следовательно, не только нога с манжетой, но и без манжеты находились в относительной ишемии. Поэтому мы полагаем, что из-за ишемии, мышечные волокна I типа сильно утомились время первого сета, что вызвало необходимость рекрутирования большего числа двигательных единиц, содержащих мышечные волокна типа II, как это показало увеличение ЭМГ (Таблица 2).

Кроме того, данные ЭМГ показывают, что мышечные волокна II типа рекрутировались раньше во втором и третьем сетях, чем в первом сете, по-видимому из-за остаточного утомления мышечных волокон I типа.

Постепенное увеличение ЭМГ во время эксцентрической фазы также заслуживает комментария. В течение первых нескольких повторений каждого сета, активность была низкой, как и ожидалось (примерно 25-30% от MVIA), но, как только приблизился момент концентрического отказа, активность мышцы в эксцентрическом режиме заметно возросла, и достигла уровня 50-60% от MVIA. Это свидетельствует о том, что ДЕ, содержащие быстрые мышечные волокна все чаще рекрутировались и во время эксцентрической фазы. Насколько нам известно, это увеличение активации во время эксцентрической фазы не сообщалось ранее в литературе о силовой тренировке в сочетании с ишемией мышц. Таким образом, мы полагаем, что утомление при динамической тренировке низкой интенсивности во время ишемии мышц происходит и в эксцентрическую фазу и что это может потенциально вызывать эффекты, наблюдаемые с этим видом тренировки.

Не удивительно, что утомляемость при низкой нагрузке во время силовых тренировок в значительной степени была связана с болевыми последствиями ишемии и накоплением метаболитов в четырехглавой мышце бедра. Показатели индекса Борга RPE также в целом были высокими, как и ожидалось, учитывая, что испытуемые выполняли все сеты. Интересно, что уровень боли был идентичным как с окклюзией, так и без окклюзии. В противоположность этому, в нашем предыдущем исследовании (33), окклюзия была связана с высокими болевыми ощущениями. Однако, в исследовании (33), болевые ощущения были максимальны в моменты сразу после упражнений, когда манжета еще не сдулась. Высокое давление (200 мм рт. ст.) в сочетании с относительно широкой

манжетой наверняка способствовало почти полному ограничению кровотока. В текущем исследовании применялось небольшое давление в манжете (100 мм рт. ст.). Оно, скорее всего, способствовало вымыванию метаболитов, и поэтому боль не увеличивалась во время периодов отдыха между сетами. Тем не менее, не исключено, что метаболиты, накопленные до такой степени во время и после упражнения с окклюзией, существенно повлияли на активность мышц, что объясняет достоверные различия, наблюдающиеся в третьем сете.

Хотя мы не измеряли кровотоков в данном исследовании, но данные выносливости с обратной связью от исследуемых свидетельствуют о том, что окклюзия действительно влияла на мышцы. На самом деле, несколько испытуемых испытывали затруднения в начале первого повторения во втором и третьем сетах с окклюзией, но как только им удалось сделать первый повтор, они обычно были в состоянии продолжать упражнение. Кроме того, мы определили в отдельных пилотных экспериментах, посредством ультразвуковой доплерографии, что давление в 100 мм рт. ст. в сочетании с относительно широкой манжетой снижает кровотоки в бедренной артерии в состоянии покоя в сидячем положении примерно на 50-60%. Takano et al. (24) используя узкую манжету (33 мм в ширину) и давление от 160 до 180 мм рт. ст. сообщили о сокращении кровотока в бедренной артерии в состоянии покоя в положении сидя приблизительно на 70%. Широкие манжеты, как правило, более эффективно воздействовали на кровотоки, чем узкие (9, 14). Следовательно, мы смогли использовать сравнительно низкое давление, чтобы свести к минимуму сжимающие и сдвигающие усилия в мягких тканях, в частности нервах и кровеносных сосудах (9, 14).

Как и в нашем предыдущем исследовании (33), несколько сетов с небольшими отягощениями до утомления привели к запаздывающим

болезненным ощущениям (DOMS). Однако болезненность в месте, где нога не была пережата была значительно больше, чем там, где была пережата. Это может быть объяснено большим количеством повторений и привыканием работать без ограничения кровотока. Основным фактором, приведшим к DOMS, может быть относительно высокая интенсивность, наблюдавшаяся во время эксцентрической фазы от начала и до конца каждого сета, как обсуждалось ранее. Ишемия-реперфузия и образование активных форм кислорода (АФК) также могли сыграть свою роль (29-31). Goldfarb et al. (13) сообщили, что уровень белков (карбонильных) плазмы крови, являющихся маркером АФК-опосредованного повреждения, был достоверно меньше при ограничении кровотока по сравнению с обычными тренировками с отягощениями.

Так как исследования показали гипертрофию (1, 2, 12, 17, 28) и увеличение синтеза белка в мышцах (MPS) (11) при низкоинтенсивной окклюзии (20% от максимума), поэтому кровоток в бедренной артерии может быть недостаточным уже при низкой нагрузке во время непрерывных динамических разгибаний в КС (21). Мы ранее предположили, что окклюзия мышц при низких интенсивностях (примерно 20-30% от максимума) в этом упражнении, если они будут выполняться без отдыха (32) может вызывать гипертрофию мышц. В соответствии с этой гипотезой, Burd et al. (7) недавно сообщили о проведении предварительного исследования. Они показали, что четыре сета упражнений, выполняемых до отказа с отягощением в 30% от максимума, вызывают увеличение синтеза белка в той же степени, как и четыре сета с отягощением 90% от максимума. В то же время, выполняя четыре сета с отягощением в 30% от максимума с субмаксимальными усилиями привело к заметно меньшей стимуляции синтеза белка в мышцах. Будущие исследования должны показать, увеличивает ли утомление срочный мышечный син-

тез белка (MPS) при упражнениях низкой интенсивности без окклюзии и будет ли иметь место увеличение мышечной массы и силы после тренировочного периода.

Основным ограничением данного исследования является то, что это был эксперимент, изучающий срочные, а не долговременные эффекты. Поэтому, при в обсуждении необходима некоторая осторожность. Кроме того, мы признаем, что измеряли только несколько переменных (активность мышц и работу) из многих, что могли повлиять на гипертрофический ответ, как это рассмотрено Wernborn et al. (32) и Manini & Klark (19). Например, при ограниченном кровотоке может быть большее возрастание местных метаболитов и больший отклик факторов роста и гормонов. С другой стороны, больший объем работы и чуть большая мышечная активность во время эксцентрической фазы теоретически может привести к большей адаптации для режима без ограничения кровотока. Наконец, результаты настоящего исследования, состоящего из динамического разгибания в КС с переменным сопротивлением не обязательно распространяется на другие упражнения или другие группы мышц.

Практическое применение

Окклюзионная манжета снижает мышечную выносливость при низких нагрузках, но не приводит к большей максимальной мышечной активности четырехглавой мышцы бедра при выполнении упражнений на разгибание колена, если они выполняются в режиме концентрического отказа. Упражнения на разгибание колена при переменных сопротивлениях могут самостоятельно индуцировать относительную ишемию уже при низких нагрузках, если они проводятся в непрерывном режиме, без расслабления мышц между повторениями. Высокая степень мышечной

активации свидетельствует о том, что эти методы могут быть полезны в реабилитации (например, после спортивных травм), при которых большие нагрузки иногда могут быть противопоказаны. Однако, поскольку довольно болезненно тренироваться до концентрического отказа при таких низких нагрузках независимо от того используется бароманжеты или нет, применение этих методов может быть предложено только для высокомотивированных индивидов. Кроме того, выполнение большого количества сетов разгибания ноги в коленном суставе до утомления мышц при таких низких нагрузках часто приводит к запаздывающим болезненным ощущениям, поэтому объем или уровень усилий, наверное, должны быть изначально ограничены.

Литература

1. Abe, T, Kawamoto, K, Yasuda, T, Kearns, CF, Midorikawa, T, and Sato, Y. Eight days Kaatsu resistance training improved sprint but not jump performance in collegiate male track and field athletes. *Int J Kaatsu Training Res* 1: 23–28, 2005. Available at: http://www.jstage.jst.go.jp/browse/ijktr/_vols. Accessed April 2005.
2. Abe, T, Yasuda, T, Midorikawa, T, Sato, Y, Kearns, CF, Inoue, K, Koizumi, K, and Ishii, N. Skeletal muscle size and circulating IGF-1 are increased after two weeks of twice daily kaatsu resistance training. *Int J Kaatsu Training Res* 1: 7–14, 2005. Available at: http://www.jstage.jst.go.jp/browse/ijktr/_vols. Accessed April 2005.
3. Alkner, BA, Tesch, PA, and Berg, HE. Quadriceps EMG/force relationship in knee extension and leg press. *Med Sci Sports Exerc* 32: 459–463, 2000.
4. Andersen, LL, Magnusson, SP, Nielsen, M, Haleem, J, Poulsen, K, and Aagaard, P. Neuro-muscular activation in conventional therapeutic exercises and heavy resistance exercises: implications for rehabilitation. *Phys Ther* 86: 683–697, 2006.
5. Bangsbo, J and Hellsten, Y. Muscle blood flow and oxygen uptake in recovery from exercise. *Acta Physiol Scand* 162: 305–312, 1998.
6. Borg, G. *Borg's Perceived Exertion and Pain Scales*. Champaign, IL: Human Kinetics, 1998.
7. Burd, NA, West, DW, Staples, AW, Holwerda, AM, Moore, DR, Tang, JE, Baker, SK, and Phillips, SM. Influence of muscle contraction intensity and fatigue on muscle protein synthesis (MPS) following resistance exercise [Abstract]. *Med Sci Sports Exerc* 41(5 Suppl): 149, 2009.
8. Cook, SB, Clark, BC, and Ploutz-Snyder, LL. Effects of exercise load and blood-flow restriction on skeletal muscle function. *Med Sci Sports Exerc* 39: 1708–1713, 2007.
9. Crenshaw, AG, Hargens, AR, Gershuni, DH, and Rydevik, B. Wide tourniquet cuffs more effective at lower inflation pressures. *Acta Orthop Scand* 59: 447–451, 1988.
10. Deschenes, MR and Kraemer, WJ. Performance and physiologic adaptations to resistance training. *Am J Phys Med Rehabil* 81(11 Suppl): S3–S16, 2002.

11. Fujita, S, Abe, T, Drummond, MJ, Cadenas, JG, Dreyer, HC, Sato, Y, Volpi, E, and Rasmussen, BB. Blood flow restriction during low-intensity resistance exercise increases S6K1 phosphorylation and muscle protein synthesis. *J Appl Physiol* 103: 903–910, 2007.
12. Fujita, T, Brechue, WF, Kurita, K, Sato, Y, and Abe, T. Increased muscle volume and strength following six days of low-intensity resistance training with restricted muscle blood flow. *Int J Kaatsu Training Res* 4: 1–8, 2008. Available at: http://www.jstage.jst.go.jp/browse/ijktr/_vols. Accessed December 2008.
13. Goldfarb, AH, Garten, RS, Chee, PD, Cho, C, Reeves, GV, Hollander, DB, Thomas, C, Aboudehen, KS, Francois, M, and Kraemer, RR. Resistance exercise effects on blood glutathione status and plasma protein carbonyls: Influence of partial vascular occlusion. *Eur J Appl Physiol* 104: 813–819, 2008.
14. Graham, B, Breault, MJ, McEwen, JA, and McGraw, RW. Occlusion of arterial flow in the extremities at subsystolic pressures through the use of wide tourniquet cuffs. *Clin Orthop* 286: 257–261, 1993.
15. Hoeger, WWK, Hopkins, DR, Barette, SL, and Hale, DF. Relationship between repetitions and selected percentages of one repetition maximum: A comparison between untrained and trained males and females. *J Appl Sports Sci Res* 4: 47–54, 1990.
16. Krustrup, P, Soerdelund, K, Relu, MU, Ferguson, RA, and Bangsbo, J. Heterogeneous recruitment of quadriceps muscle portions and fibre types during moderate intensity knee-extensor exercise: effect of thigh occlusion. *Scand J Med Sci Sports* 19: 576–584, 2009.
17. Kubo, K, Komuro, T, Ishiguro, N, Sato, Y, Ishii, N, Kanehisa, H, and Fukunaga, T. Effects of low-load resistance training with vascular occlusion on the mechanical properties of muscle and tendon. *J Appl Biomech* 22: 112–119, 2006.
18. Lutjemeier, BJ, Miura, A, Scheuermann, BW, Koga, S, Townsend, DK, and Barstow, TJ. Muscle contraction-blood flow interactions during upright knee extension exercise in humans. *J Appl Physiol* 98: 1575–1583, 2005.
19. Manini, TM and Clark, BC. Blood flow restricted exercise and skeletal muscle health. *Exerc Sport Sci Rev* 37: 78–85, 2009.
20. Rainoldi, A, Melchiorri G, and Carusi, I. A method for positioning electrodes during surface EMG recordings in lower limb muscles. *J Neurosci Methods* 134: 37–43, 2004.
21. Shoemaker, JK, Hodge, L, and Hugson, RL. Cardiorespiratory kinetics and femoral artery blood velocity during dynamic knee extension exercise. *J Appl Physiol* 77: 2625–2632, 1994.
22. Staron, RS, Malicky, ES, Leonardi, MJ, Falkel, JE, Hagerman, FC, and Dudley, GA. Muscle hypertrophy and fast fiber type conversions in heavy resistance-trained women. *Eur J Appl Physiol* 60: 71–79, 1990.
23. Tagesson, SK and Kvist, J. Intra- and interrater reliability of the establishment of one repetition maximum on squat and seated knee extension. *J Strength Cond Res* 21: 801–807, 2007.
24. Takano, H, Morita, T, Iida, H, Asada, K, Kato, M, Uno, K, Hirose, K, Matsumoto, A, Takenaka, K, Hirata, Y, Eto, F, Nagai, R, Sato, Y, and Nakajima, T. Hemodynamic and hormonal responses to a short-term low-intensity resistance exercise with the reduction of muscle blood flow. *Eur J Appl Physiol* 95: 65–73, 2005.
25. Takarada, Y, Nakamura, Y, Aruga, S, Onda, T, Miyazaki, S, and Ishii, N. Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion. *J Appl Physiol* 88: 61–65, 2000.
26. Takarada, Y, Sato, Y, and Ishii, N. Effects of resistance exercise combined with vascular occlusion on muscle function in athletes. *Eur J Appl Physiol* 86: 308–314, 2002.

27. Takarada, Y, Takazawa, H, Sato, Y, Takebayashi, S, Tanaka, Y, and Ishii, N. Effects of resistance exercise combined with moderate vascular occlusion on muscular function in humans. *J Appl Physiol* 88: 2097–2106, 2000.
28. Takarada, Y, Tsuruta, T, and Ishii, N. Cooperative effects of exercise and occlusive stimuli on muscular function in low-intensity resistance exercise with moderate vascular occlusion. *Jpn J Physiol* 54: 585–592, 2004.
29. Tanimoto, M, Madarame, H, and Ishii, N. Muscle oxygenation and plasma growth hormone concentration during and after resistance exercise: Comparison between “KAATSU” and other types of regimen. *Int J Kaatsu Training Res* 1: 51–56, 2005. Available at: http://www.jstage.jst.go.jp/browse/ijktr/_vols. Accessed February 2008.
30. Uchiyama, S, Tsukamoto, H, Yoshimura, S, and Tamaki, T. Relationship between oxidative stress in muscle tissue and weightlifting-induced muscle damage. *Pflügers Arch* 452: 109–116, 2006.
31. Volek, JS, Kraemer, WJ, Rubin, MR, Gomez, AL, Ratamess, NA, and Gaynor, P. L-carnitine L-tartrate supplementation affects markers of recovery from exercise stress. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 282: E474–E482, 2002.
32. Wernbom, M, Augustsson, J, and Raastad, T. Ischemic strength training: a low-load alternative to heavy resistance exercise? *Scand J Med Sci Sports* 18: 401–416, 2008.
33. Wernbom, M, Augustsson, J, and Thomee', R. Effects of vascular occlusion on muscular endurance in dynamic knee extension exercise at different submaximal loads. *J Strength Cond Res* 20: 372–377, 2006.
34. Yasuda, T, Brechue, WF, Fujita, T, Sato, Y, and Abe, T. Muscle activation during low-intensity muscle contractions with varying levels of external limb compression. *J Sports Sci Med* 7: 467–474, 2009.
35. Yasuda, T, Brechue, WF, Fujita, T, Shirakawa, J, Sato, Y, and Abe, T. Muscle activation during low-intensity muscle contractions with restricted blood flow. *J Sports Sci* 27: 479–489, 2009.

Перевод осуществляли магистранты:

- С.Н. Галкина – Abstract
- П.В. Галкин – Введение
- А.А. Полушкина – Методы: экспериментальный подход к проблеме, исследуемые,
- П.А. Полушкин – тестирование силы и ознакомительные процедуры
- А.В. Садовников – Тестирование выносливости
- М.М. Микайлов – электромиография и гониометрия
- Л.В. Набока – электромиография и гониометрия
- А. А. Титова – табл. 2
- К.А. Меньшиков – статистический анализ, результаты (табл. 3)
- А.С. Голубев – Обсуждение
- Е.А. Зуев – Обсуждение
- В.А. Варфоломеев – Обсуждение
- Д.П. Накоряков – Обсуждение
- О.Н. Дубко – практическое применение
- Общая редакция текста – А.В. Самсонова