

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2012
УДК 612.741.63:612.134].08

Гемодинамическая эффективность электрической стимуляции мышц голени

*Л. А. Лаберко, В. Е. Баринов, К. В. Лобастов, Н. А. Бармотин**

РНИМУ им. Пирогова; Городская клиническая больница № 13*, Москва

Стаз венозной крови, определенный более 150 лет назад Рудольфом Вирховым как один из важнейших механизмов патогенеза внутрисосудистого тромбообразования, считается неотъемлемым спутником послеоперационного периода. При замедлении венозного оттока из нижних конечностей во время и после хирургического вмешательства используются механические методы профилактики венозных тромбоэмболических осложнений (ВТЭО), из которых наиболее хорошо известными и широко используемыми являются компрессионные методики.

В то же время метод электрической стимуляции мышц голени (ЭМС), активно применявшийся во второй половине XX века, на сегодняшний день используется редко. Однако именно ЭМС воздействует на наиболее физиологичный механизм венозного возврата – мышечно-венозную помпу голени и, по мнению ряда авторов, способствует эффективному дренированию зон максимальной стагнации – вен и синусов икроножной и камбаловидной мышц [2, 4, 7].

История развития метода электрической стимуляции мышц голени показала серьезную зависимость изменений регионарной венозной гемодинамики от параметров переменного тока. Не до конца изученным остается вопрос о возможности электроимпульсного воздействия обеспечить более эффективный гемодинамический ответ по сравнению с активным мышечным сокращением. Определенный интерес также представляет влияние антропометрических особенностей пациентов и степени развития мышц икры на эффективность электрической стимуляции с точки зрения гемодинамики венозного возврата.

Цель исследования: произвести сравнительную оценку скоростных показателей венозного кровотока на подколенной вене на фоне электрической стимуляции и активного сокращения мышц голени.

Материалы и методы

На базе отделения ультразвуковой диагностики ГКБ № 13 проведено исследование по изучению регионарной венозной гемодинамики с участием 21 здорового добровольца. Основными критериями

включения в исследование были возраст старше 18 лет, отсутствие заболеваний венозной системы, отсутствие хронических заболеваний внутренних органов, добровольное согласие на участие. Возраст испытуемых варьировался от 18 до 27 лет (в среднем $21,8 \pm 2,4$ года).

Исследование начинали с определения антропометрических параметров, при этом рост участников колебался от 160 до 181 см (в среднем $168,9 \pm 6,8$ см), масса тела 50–90 кг (в среднем $65,5 \pm 11,7$ кг), индекс массы тела 18,6–28,4 (в среднем $22,8 \pm 2,8$), окружность самой узкой части голени (маллеолярный периметр) 18–24 см (в среднем $20,4 \pm 1,8$ см). Далее проводили опрос испытуемых на предмет занятия спортом или характера физической активности, сопряженной с нагрузками на нижние конечности. При этом 57% участников указали на наличие спортивной активности (бег, теннис, бокс, спортивная гимнастика, фитнес и аэробика).

Перед началом исследования участники в течение 15 мин отдыхали в положении лежа на спине с целью стабилизации базального уровня венозного кровотока. Затем занимали горизонтальное положение на животе со слегка согнутой в коленном суставе левой нижней конечностью, для чего под область голеностопного сустава подкладывали валик диаметром 20 см при сохранении полной подвижности сочленения.

Скоростные показатели кровотока измеряли на левой подколенной вене в верхнем углу подколенной ямки выше сафенопоплитеального соустья (при его типичном расположении) или выше устья суральных вен (при атипичном впадении малой подкожной вены). Измерения проводили на аппарате "Prosound $\alpha 10$ premier" ("Aloka", Япония) с программным пакетом для гемодинамических исследований линейным датчиком 7,5 МГц в режиме цветового картирования кровотока с выведением кривой импульсно-волнового доплера.

Подколенная вена исследовалась в продольном сечении под углом 30–60° к оси сосуда, коэффициент поправки учитывался автоматически аппаратом после ручного определения оси. Измеряли пиковую скорость кровотока (ПСК, см/с) и объемную скорость кровотока (ОСК, мл/мин) за 3 с по диаметру сосуда. В связи с высокой вариабельностью скоростных показателей венозной гемодинамики все измерения по-

Лаберко Леонид Александрович, д-р мед. наук, проф. каф. общей хирургии лечебного факультета, e-mail: laberko@list.ru

вторяли 3 раза и для оценки использовали среднее значение.

Измерения проводили в покое после 15-минутного отдыха, при активном подошвенном сгибании стопы с продолжительностью контракции икроножной мышцы около 3 с (активное мышечное сокращение – АМС) и на фоне электрической стимуляции мышц голени. Интервал между измерениями составлял 5 мин. ЭМС проводили с помощью портативного аппарата "Veinoplus" ("Ad Rem Technology", Франция, рег. удостоверение Росздравнадзора ФС № 2006/2208). Особенностью устройства является изменяющаяся от 1 до 250 Гц частота биполярных псевдосимметричных прямоугольных электрических импульсов, подающихся пачками продолжительностью по 160 мс (плато 50 мс) с нарастающей частотой залпов от 60 до 105 в 1 мин, обеспечивающих безболезненные тетанические мышечные сокращения. При этом частота залпов и соответственно мышечных контракций автоматически увеличивается каждые 5 мин в течение 20-минутного периода работы аппарата.

Для проведения ЭМС на область икроножных мышц фиксировали индивидуальные самоклеющиеся электроды, мощность электрического воздействия (измеряемую у данного устройства в условных единицах) подбирали индивидуально, увеличивая до максимально переносимого уровня. У лиц с хорошей переносимостью мощность увеличивали до появления интенсивных сгибаний стопы без вынужденных движений всей нижней конечности. ЭМС проводили на протяжении 3 мин от момента включения аппарата, при этом измерения повторяли каждую минуту. С учетом режима работы устройства скорость кровотока была измерена при частоте 60 сокращений в минуту.

Статистическая обработка данных осуществлялась в программах MS Office Excel 2010 и SPSS 19. Числовые величины представлены в виде медиан с интерквартильным размахом 25–75-й перцентили, средних величин со стандартным отклонением. Статистическая значимость оценивалась с помощью теста Фридмана, попарное сравнение производилось с помощью теста Уилкоксона с поправкой Бонферрони. Наиболее значимые предикторы выявляли с помощью регрессионного анализа в виде автоматизированного линейного моделирования. Статистически достоверными считались результаты при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Результаты измерения скорости кровотока представлены в таблице.

Медиана с интерквартильным размахом 25–75-го перцентилей для ПСК в покое составила 15,9 (13,7–23,3) см/с. АМС достоверно повышало ПСК до 55,2 (45,2–60,3) см/с ($p < 0,001$), а ЭМС – до 76,3 (39,3–99,1) см/с ($p < 0,001$). При этом достоверной разницы в ПСК, зарегистрированной при активной и стимулированной контракции выявлено не было ($p = 0,192$).

Медиана объемной скорости венозного оттока в покое была равна 223 (132–258) мл/мин и достовер-

но повышалась при АМС до 346 (206–424) мл/мин ($p < 0,001$). При применении ЭМС данный показатель возрастал до 263 (175–372) мл/мин ($p = 0,012$). При этом активное сгибание обеспечивало достоверно большее увеличение объема оттекаемой венозной крови ($p = 0,009$).

При целенаправленном сканировании суральных синусов наблюдали значительное уменьшение их диаметра на фоне активного и стимулированного мышечного сокращения. При этом синусы икроножной мышцы при активном сгибании и электрической стимуляции уменьшались в размерах, но полной их окклюзии не наблюдалось. В то же время просвет синусов камбаловидной мышцы, отличавшихся исходно большим диаметром, на фоне активного сгибания стопы полностью исчезал, а при проведении ЭМС значительно уменьшался вплоть до полной окклюзии в отдельных случаях.

Результаты регрессионного анализа показали, что при активном сгибании на ПСК оказывают достоверное влияние занятие спортом и принадлежность к мужскому полу (при этом достоверных различий в частоте занятия спортом между мужчинами и женщинами не выявлено). На величину ОСК оказывают влияние также занятие спортом и длина окружности самого узкого места голени. Для электрической стимуляции мышц голени на ПСК достоверное влияние оказывает возраст (положительная связь) и рост (отрицательная связь), на ОСК – недостоверное влияние оказывает только малеоллярный периметр.

Первые попытки электрической стимуляции венозного оттока крови из нижних конечностей были предприняты более полувека назад. А. Nicolaides и соавт. [10] одними из первых применили методику у 116 пациентов хирургического профиля. Для этой цели они использовали устройство "Thrombophylactor", генерировавшее единичные электрические импульсы прямоугольной формы с модулируемой продолжительностью. Авторы установили, что для максимального ускорения кровотока, регистрируемого на бедренной вене методом доплерографии, необходим импульс длительностью 50 мс. Более короткие импульсы не вызывали достаточного сокращения, а более длительные – провоцировали двойную контракцию, не дававшую дополнительного прироста скорости. Также была выявлена оптимальная частота стимуляции, составившая 12–15 импульсов в

Результаты измерения скоростных показателей кровотока на подколенной вене

Скорость кровотока		Отдых	АМС	ЭМС
ПСК, см/с	$M \pm \sigma$	18,5 ± 9,2	58,5 ± 28,2	69,2 ± 30,8
	Me	15,9	55,2	76,3
	[25; 75]	[13,7; 23,3]	[45,2; 60,3]	[39,3; 99,2]
ОСК, мл/мин	$M \pm \sigma$	202,3 ± 88,8	444,0 ± 329,7	293,6 ± 160,8
	Me	223	346	263
	[25; 75]	132; 258]	[206; 424]	[175; 372]

минуту, обусловленная минимальным временем, необходимым для адекватного наполнения вен голени. С помощью указанного устройства исследователям удалось снизить частоту венозного тромбоза у оперированных пациентов на 92%. Между тем основным недостатком методики явилась интенсивная боль, сопровождавшая сокращение, что ограничило использование устройства у пациентов в ясном сознании.

Дальнейшее исследование электрической стимуляции мышц голени связано с поиском оптимальных характеристик импульсного тока. Так, В. Lindstrom и соавт. [8] предложили применять серии электрических импульсов для более эффективного изгнания крови из нижних конечностей. На основании регистрации объема кровенаполнения голени методом плетизмографии у пациентов, подвергавшихся хирургическому лечению, исследователи установили, что короткое тетаническое сокращение мышц икры способствует более значительному уменьшению объема голени.

Авторы, использовали стимулятор, генерирующий прямоугольные импульсы, модулируемые по продолжительности, амплитуде и частоте. При анализе продолжительности импульса было установлено, что у хирургических пациентов она должна превышать 25 мс, так как меньшая величина не приводит к мышечному сокращению на фоне введения миорелаксантов. Авторам удалось добиться максимального уменьшения объема голени на фоне стимуляции группами по 6 импульсов длительностью 50 мс с внутригрупповой частотой 8 Гц и частотой сокращений 8 контракций в мин.

Современные миостимуляторы генерируют симметричные двухфазные импульсы с заданной частотой, от которой зависит реакция мышцы на электрическое воздействие. Так, при ее величине от 1 до 10 Гц возникают подергивания отдельных мышечных волокон, а при частоте 30–50 Гц происходит единое тетаническое сокращение [12]. Т. Janssen и соавт. [6] показали, что одиночные фасцикуляции мышц голени при частоте электроимпульсного воздействия 1 Гц не приводят к значительному ускорению кровотока, в то время как импульсы, подаваемые с частотой 3 и 35 Гц, повышают ПСК на 62 и 95% соответственно.

G. Lyons и соавт. [9] продемонстрировали, что частота электрических импульсов 35 Гц в большей степени увеличивает ПСК на подколенной вене, чем аналогичное воздействие с частотой 25 Гц. Частота 30 Гц является пограничной для развития мощного тетанического сокращения [12], именно поэтому большинство исследователей в последние десятилетия используют именно ее [2, 3, 9].

Другой важной характеристикой электроимпульсного воздействия является частота стимулированных мышечных сокращений. В современных устройствах импульсы подаются залпами регулируемой продолжительности. Каждый залп имеет 3 фазы: подъем (ramp up), плато, и спуск (ramp down), что обеспечивает плавное нарастание и уменьшение силы мышечного ответа. Наличие волнообразного характера

стимуляции необходимо для исключения неожиданности мышечной контракции, которая может быть чревата неприятными эмоциональными переживаниями пациента, повышением тонуса и даже клонической судорогой мышц-антагонистов. Продолжительность эффективного сокращения определяется временем плато и в современных исследованиях миостимуляции составляет в среднем 1–2 с [2, 3, 9]. Частота контракций обычно задается в пределах от 1 до 8 в минуту для обеспечения наиболее полного наполнения суральных вен в паузах и достижения высоких скоростных показателей кровотока.

Так, В. Broderick и соавт. [2] при частоте стимуляции 1 раз в минуту (частота импульсов 36 Гц, время контракции 1,2 с, подъем 0,5 с, спуск 0,2 с) удалось продемонстрировать 7,5-кратное увеличение ПСК и 4-кратное увеличение ОСК на подколенной вене. Среднее же увеличение линейной скорости на фоне ЭМС составляет 2–4 раза, причем большая кратность характерна для подколенной вены по сравнению с бедренной [3, 6, 9]. С возрастанием частоты залпов скоростные параметры кровотока снижаются в связи с уменьшением объема венозного русла нижних конечностей и снижением "преднагрузки" на мышечно-венозную помпу. Между тем данный факт не должен рассматриваться с позиции уменьшения эффективности методики. Снижение объема изгнанной крови за одиночное сокращение компенсируется увеличением числа сокращений, поэтому суммарный объем изгнания за минуту возрастает [5].

Таким образом, применение электроимпульсного воздействия на икроножную мышцу позволяет в значительной степени увеличивать скоростные показатели венозного оттока. По нашим результатам гемодинамический ответ при использовании устройства "Veinoplus" ни в чем не уступает активному мышечному сокращению. Применение ЭМС обеспечивает увеличение ПСК на подколенной вене в 4,8 раза по сравнению с базальным уровнем, что несколько превышает аналогичный показатель для активного сгибания (3,5 раза). Учитывая роль ускоренного кровотока в регуляции тромборезистентности эндотелия путем повышения напряжения сдвига [11], обнаруженный прирост скоростных показателей позволяет ожидать высокую клиническую эффективность методики с позиции профилактики ВТЭО.

В отношении влияния электрической стимуляции мышц голени на суральные синусы полученные результаты демонстрируют определенную эффективность методики в вопросе дренирования данных зон стагнации. Между тем, учитывая более выраженное спадание сосудов при активном, чем при стимулированном мышечном сокращении, механизмы опорожнения суральных синусов требуют дальнейшего изучения. Вероятно, причина полученных различий кроется в переменном характере частоты электрического тока и относительно небольшой продолжительности стимулированного тетанического сокращения.

Учитывая ограниченный первыми минутами работы устройства срок наблюдения за суральными си-

нусами, в зону внимания могли попасть лишь слабые мышечные сокращения в ответ на низкочастотную стимуляцию, а сильные тетанические сокращения, генерируемые током высокой частоты, были упущены. Также в условиях эксперимента активное напряжение мышц икры имело продолжительность около 3 с, в то время как стимулированная контракция в соответствии с техническими характеристиками аппарата "Veinoplus" продолжалась лишь 160 мс. Таким образом, вопрос поиска оптимальных параметров электрического тока для максимально эффективного опорожнения суральных синусов остается открытым.

Что касается вопроса о зависимости скоростных показателей кровотока, регистрируемых при ЭМС, от анатомо-физиологических особенностей мышц голени, в частности от степени ее развития и функционального состояния, то полученные нами результаты сопоставимы с данными зарубежной литературы. Известно, что величины линейной и объемной скорости кровотока на фоне электрической стимуляции мышц голени зависят преимущественно от антропометрических особенностей конечности [5], что подтверждают наши результаты.

Основными факторами, оказывающими влияние на ПСК и ОСК при ЭМС оказались рост (определяющий длину мышцы) и маллеолярный периметр (определяющий объем конечности). При этом функциональные особенности (степень развития мышцы) не играли существенной роли в определении гемодинамической эффективности миостимуляции в отличие от активного сгибания.

Таким образом, методика ЭМС имеет предпосылки к эффективному использованию у широкой категории пациентов вне зависимости от функционального состояния опорно-двигательного аппарата, в том числе у больных с дистрофическими изменениями мускулатуры, парезами и параличами конечностей и пр. Эффективность клинического применения ЭМС у пациентов с моторным дефицитом уже была продемонстрирована в предыдущих исследованиях [1].

Выводы

1. Электрическая стимуляция мышц голени двухфазными биполярными прямоугольными электрическими импульсами с модулируемой частотой тока 1–250 Гц, продолжительностью залпа 160 мс (плато 50 мс) и частотой мышечных сокращений 60 в минуту с позиции гемодинамики не менее эффективна, чем активное мышечное сокращение.

2. Гемодинамический эффект от миостимуляции в большей степени зависит от антропометрических особенностей мышцы и в меньшей степени – от ее функционального состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаберко Л. А., Баринов В. Е., Лобастов К. В. и др. // Физиотер., бальнеол. и реабил. – 2012. – № 1. – С. 13–17.
2. Broderick B. J., O'Briain D. E., Breen P. P. et al. // Med. Engineer. Phys. – 2010. – Vol. 32, N 4. – P. 349–355.
3. Clarke Moloney M., Lyons G. M., Breen P. et al. // Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg. – 2006. – Vol. 31. – P. 300–305.
4. Faghri P. D., Van Meerdervort H. F., Glaser R. M., Fighi S. F. // IEEE Trans. Rehabil. Eng. – 1997. – Vol. 5, N 1. – P. 62–69.
5. Griffin M., Nicolaidis A. N., Bond D. et al. // Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg. – 2010. – Vol. 40, N 6. – P. 766–771.
6. Janssen T. W., Hopman M. T. // Arch. Phys. Med. Rehabil. – 2003. – Vol. 84, N 7. – P. 982–987.
7. Laverick M. D., McGivern R. C., Crone M. D., Mollan R. A. B. // Phlebology. – 1990. – Vol. 5. – P. 285–290.
8. Lindström B., Holmdahl C., Jonsson O. et al. // Br. J. Surg. – 1982. – Vol. 69, N 11. – P. 633–637.
9. Lyons G. M., Leane G. E., Grace P. A. // Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg. – 2002. – Vol. 23, N 6. – P. 564–566.
10. Nicolaidis N., Kakkar V. V., Field E. S., Fish P. // Br. Med. J. – 1972. – Vol. 3, N 5829. – P. 756–758.
11. Papaioannou T. G., Stefanadis C. // Hellenic. J. Cardiol. – 2005. – Vol. 46, N 1. – P. 9–15.
12. Reed B. // Pediatr. Phys. Ther. – 1997. – Vol. 9. – P. 96–102.

Поступила 11.09.12

РЕЗЮМЕ

Ключевые слова: электромиостимуляция мышц голени, гемодинамика, венозный тромбоз, профилактика

С помощью дуплексного ангиосканирования с цветовым картированием кровотока и выведением доплеровской кривой изучили скоростные показатели регионарной венозной гемодинамики на подколенной вене в покое, на фоне активного мышечного сокращения (АМС) и электрической стимуляции мышц голени (ЭМС) устройством "Veinoplus". Пиковая скорость кровотока в покое составила 15,9 см/с и достоверно повышалась в 3,5 раза на фоне АМС и в 4,8 раза на фоне ЭМС. Объемная скорость кровотока в покое составила 223 мл/мин и достоверно возрастала при АМС в 1,6 раза и при ЭМС в 1,2 раза. При этом ее значение при активном сокращении оказалось достоверно выше, чем при стимулированном. При сканировании суральных синусов выявлено уменьшение их диаметра вплоть до полной окклюзии на фоне мышечного сокращения. По результатам регрессионного анализа установлено, что эффективность гемодинамического ответа на ЭМС зависит в основном от анатомических особенностей мышц голени и практически не зависит от их функционального состояния.

HEMODYNAMIC EFFICACY OF ELECTRICAL STIMULATION OF CRURAL MUSCLES

Laberko L.A., Barinov V.E., Lobastov K.V., Barmotin N.A.

Ultrasound duplex angioscanning with colour mapping of the blood flow and construction of the Doppler curve were employed to study characteristics of regional venous hemodynamics in the popliteal vein during active muscle contraction (AMC)/relaxation and electromyostimulation (EMS) of crural muscles using a Veinoplus device. It was shown that peak blood flow velocity at rest equaled 15.9 cm/s and substantially increased by 3.5 and 4.8 times in case of AMC and EMS respectively. The volumetric blood flow at rest was 223 ml/min and increased by 1.6 and 1.2 times in case of AMC and EMS respectively (the difference is significant). Scanning of sural sinuses revealed a decrease of their diameter up to complete occlusion under effect of AMC. Regression analysis showed that the hemodynamic response to EMS depends largely on anatomic features of crural muscles but not their functional state.

Key words: hemodynamic efficacy, crural electromyostimulation