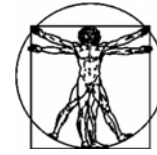


DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2018.1.07
УДК 531/534: [57+61]



**Российский
Журнал
Биомеханики**
www.biomech.ru

КРИТЕРИИ ОСВОЕНИЯ НАВЫКОВ ХОДЬБЫ В ЭКЗОСКЕЛЕТЕ У ПАЦИЕНТОВ С ПОСЛЕДСТВИЯМИ ПОЗВОНОЧНО- СПИННОМОЗГОВОЙ ТРАВМЫ

Е.В. Письменная¹, К.А. Петрушанская², Е.Ю. Шапкова³

¹ Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Россия, 119192, Москва, Мичуринский пр., 1, e-mail: epismen@yandex.ru

² Общество с ограниченной ответственностью «ЭкзоАтлет», Россия, 119121, Москва, 1-й Тружеников пер., 15, офис 1, e-mail: info@exoatlet.ru

³ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии Министерства здравоохранения Российской Федерации, Россия, 191036, Санкт-Петербург, Лиговский пр., 2, e-mail: spbniif_all@mail.ru

Аннотация. В данной статье впервые в России рассматривается проблема реабилитации пациентов с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы посредством применения экзоскелета. Предложен новый метод реабилитации данного контингента больных – ходьба в экзоскелете, он позволяет значительно расширить контингент инвалидов, т.е. применять его у больных не только с парапарезами нижних конечностей, но и с полной нижней параплегией. С точки зрения авторов, одним из наиболее эффективных методов реабилитации таких больных является сочетание тренировки в экзоскелете с чрескожной электрической стимуляцией спинного мозга. Авторы выявили отличия биомеханической структуры ходьбы в экзоскелете у здоровых людей и пациентов с травмой спинного мозга, а также определили методику применения чрескожной электрической стимуляции спинного мозга в сочетании с тренировкой ходьбы в экзоскелете. После интенсивного курса тренировок в экзоскелете с чрескожной электрической стимуляцией спинного мозга у четырех из шести пациентов увеличилась болевая и тактильная чувствительность, все шесть пациентов отмечали появление парестезии в ногах ниже зоны анестезии, появление ощущения пассивного движения в суставах и «чувство опоры» при стоянии. Было выявлено, что после 10-дневного курса тренировки ходьбы в экзоскелете в сочетании с чрескожной электрической стимуляцией спинного мозга у больных отмечаются следующие положительные изменения: повышается устойчивость, увеличивается опорная и толчковая функции нижних конечностей, изменяется форма вертикальной составляющей R_z опорной реакции, уменьшается время опоры на костыли. При этом у 2 из 6 пациентов улучшение происходит во время первого пробного сеанса ходьбы в экзоскелете в сочетании с чрескожной электрической стимуляцией спинного мозга, в частности, изменение временной структуры шага (уменьшение длительности опорной и двуопорной фаз и увеличение длительности переносной фазы, уменьшение времени опоры на костыли), незначительное увеличение амплитуды переднего и заднего толчков. Можно полагать, что даже незначительные положительные изменения двигательных функций во время первого сеанса являются критериями благоприятных результатов и могут быть использованы для выявления реабилитационного потенциала, а в последующем и для реабилитационного прогноза.

© Письменная Е.В., Петрушанская К.А., Шапкова Е.Ю., 2018

Письменная Елена Валентиновна, к.т.н., доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского института механики, Москва

Петрушанская Кира Анатольевна, к.б.н., общество с ограниченной ответственностью «ЭкзоАтлет», Москва

Шапкова Елена Юрьевна, к.б.н., ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института фтизиопульмонологии, Санкт-Петербург

Ключевые слова: экзоскелет, спинно-мозговая травма, реабилитация, чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга, биомеханическая структура ходьбы, вертикальная составляющая опорной реакции.

ВВЕДЕНИЕ

Позвоночно-спинномозговая травма принадлежит к числу тяжелых повреждений человеческого организма и приводит к развитию сложнейшего комплекса структурных и функциональных изменений, отражающихся на всей жизнедеятельности организма. Тяжесть этого процесса обусловлена характером, протяженностью, уровнем и степенью повреждения спинного мозга. Повреждения спинного мозга при травмах позвоночника отличаются тяжелыми последствиями в виде двигательных, чувствительных, трофических и других расстройств, приводящих к стойкой утрате трудоспособности. Даже частичное повреждение спинного мозга обрекает большинство больных на многолетние страдания [1, 2, 5–11].

Поскольку двигательные нарушения отмечаются у 100% больных, то одной из основных проблем реабилитации данного контингента является восстановление функции передвижения. Восстановление двигательных функций, в частности ходьбы, у таких больных – сложная задача, требующая применения длительного комплексного лечения (хирургического, медикаментозного, физиотерапевтического), лечебной физкультуры и ортезирования [1, 2, 5–11]. Однако использование большого комплекса лечебных мероприятий не всегда оказывается результативным.

Одним из наиболее современных и эффективных методов восстановления двигательных функций у пациентов с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы является применение экзоскелета. В России в Робототехническом центре Фонда «Сколково» впервые разработан отечественный вариант экзоскелета *ExoAtlet*. Медицинский экзоскелет *ExoAtlet* предназначен для помощи людям с ограниченными физическими возможностями и может использоваться как для медицинской, так и для социальной реабилитации пациентов с нарушениями опорно-двигательных функций [6].

Необходимо отметить, что к настоящему времени сформировались два подхода к применению экзоскелетов при ходьбе у данного контингента больных – иностранный и отечественный [5, 6, 10, 11, 12–18]. С точки зрения иностранных авторов, основная цель реабилитации посредством применения экзоскелета – обеспечить больному определенную независимость от родственников и предотвратить появление вторичных осложнений, таких как заболевания сердечно-сосудистой системы, образование пролежней, нарушение функции тазовых органов, остеопороз.

Авторы полагают, что критерием освоения навыка ходьбы в экзоскелете является возможность пройти большее количество шагов, минимизация посторонней помощи, возможность выйти за пределы комнаты, зайти в лифт и выйти из него. При этом длительность курса реабилитации посредством тренировки в экзоскелете в США составляет 6 месяцев, а количество сеансов тренировки – 70. По мнению авторов, реальное восстановление двигательных функций посредством применения экзоскелета является невозможным [12–18]. С нашей точки зрения, данные критерии не являются достаточно информативными, поскольку не дают представления о тяжести двигательных нарушений и о реабилитационном потенциале каждого пациента.

Как отмечают сами авторы, локализация поражения и его тяжесть (параплегия или парапарез) не играют особой роли в определении прогноза. Помимо этого, в данных статьях отсутствуют результаты биомеханических исследований, дающих количественную оценку двигательных нарушений и их коррекции под влиянием курса тренировки ходьбы в экзоскелете [12, 13, 15, 17, 18].

Отечественный подход состоит в том, что применение экзоскелета является одним из наиболее эффективных методов медицинской реабилитации у больных с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы. С точки зрения отечественных специалистов, применение экзоскелета позволяет значительно расширить контингент больных, которым можно успешно проводить реабилитацию, распространив ее не только на пациентов с парапарезом нижних конечностей, но и на пациентов с полной параплегией [5, 6, 10, 11]. Исследования, проведенные в Национальном медико-хирургическом центре имени Н.И. Пирогова, показали, что уже под влиянием первого двухнедельного курса тренировки в экзоскелете у больных с травмой спинного мозга наблюдаются следующие положительные изменения:

- 1) они приобретают возможность стоять более продолжительное время;
- 2) они впервые приобретают навыки передвижения, обучаются воспроизводить элементы шага;
- 3) у них значительно возрастает устойчивость при стоянии;
- 4) уменьшается риск возникновения пролежней;
- 5) улучшается деятельность тазовых органов: контроль мочеиспускания, (удержание мочи в течение более длительного времени), нормализуется функция кишечного тракта;

б) уменьшается риск возникновения переломов, т.е. явления остеопороза [5, 6].

Тем не менее резкое сокращение сроков реабилитации требует поиска наиболее результативных сочетаний различных методов, в частности, сочетание ходьбы в экзоскелете с функциональной электрической стимуляцией мышц или со стимуляцией спинного мозга. Целью данной работы было оценить результаты курса реабилитации посредством сочетания ходьбы в экзоскелете с чрескожной электрической стимуляцией спинного мозга и выработать критерии эффективности проведенного курса реабилитации.

МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Клиническая оценка стеноза локомоторных нарушений

С этой целью была исследована ходьба в экзоскелете *ExoAtlet* у 5 здоровых испытуемых и у 6 пациентов с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы. Исследования были проведены в Санкт-Петербургском научно-исследовательском институте фтизиопульмонологии. Все больные были молодого возраста – от 27 до 40 лет. У всех наблюдалась нижняя полная параплегия. У 5 пациентов параличи были вызваны травмой грудного отдела позвоночника, у 1 пациента – грудопоясничного. Тяжесть поражения спинного мозга была расценена как тип *A* по шкале *Frankel* у четверых, тип *B* – у одного и тип *C* – у одного пациента.

Давность заболевания варьировалась от 1,5 до 9 лет. Тонус мышц оценен как высокий у 3 пациентов, сниженный – также у 3 пациентов. К началу исследований уровень мобильности по шкале Ривермид в группе составил от 0 до 4 баллов (в среднем $3 \pm 1,6$), уровень активности в повседневной жизнедеятельности – $50,8 \pm 19,9$ из 100 баллов по шкале Бартела. Пять пациентов из 6 ранее получали чрескожную стимуляцию спинного мозга для активизации нейронных локомоторных сетей [10, 11]. Все пациенты были ознакомлены с содержанием исследования и дали письменное согласие на участие в нем. Работа была поддержана этическим комитетом Санкт-Петербургского научно-исследовательского института фтизиопульмонологии.

Методика тренировки ходьбы в экзоскелете

Экзоскелет *ExoAtlet* рекомендован для использования людьми с полной или частичной утратой движений нижних конечностей при нормальном функционировании

рук и верхней части туловища. Задавая внешние параметры ходьбы, экзоскелет обеспечивает ходьбу с низким, средним или высоким шагом (задается углом в тазобедренных суставах) и разной длиной шага (короткий, средний или длинный шаг). Пилот осуществляет ходьбу в экзоскелете, последовательно перенося вес тела с левой ноги на правую и обратно, со значительной опорой на трости с угловым упором (канадского типа).

Экзоскелет адаптирован под антропометрические параметры пациента. На первых занятиях ассистенты обучают надевать и крепить оборудование, помогают пациенту вставать из положения сидя, стоять с опорой на руки (две трости с локтевым упором) с внешней помощью (2–3 сопровождающих) и внешним управлением с планшета. В зависимости от степени подготовленности при первоначальном обучении на освоение ходьбы с внешней страховкой требовалось от 2 до 10 занятий. К концу курса пациентам требовался лишь один помощник для обеспечения безопасности [6, 11].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для оценки ходьбы в мировой биомеханике сформировался набор необходимых первичных параметров ходьбы и соответствующие им методики исследований. Эти методы можно разделить на три основные группы: биомеханические, энергетические и электромиографические. В состав биомеханических методов изучения ходьбы входят подометрия, ихнометрия, гониометрия и динамометрия, регистрирующие соответственно временные, пространственные, кинематические и динамические параметры ходьбы [2–4]. Исследование энергетических параметров ходьбы предполагает оценку энерготрат методом математического моделирования. Наконец, исследование электромиографических параметров ходьбы предполагает регистрацию электрической активности мышц в течение локомоторного цикла – профиль электрической активности мышц [2–4].

Однако все эти методы исследований могут применяться только у тех пациентов, которые способны передвигаться либо самостоятельно, либо с помощью сопровождающего лица и средств дополнительной опоры – костылей, тростей и ходилок, но они трудноприменимы к больным с полной нижней параплегией, передвигающимся в экзоскелете. С нашей точки зрения, даже таким пациентам необходимо проводить не только клинические, но и инструментальные исследования ходьбы. Вышеназванные традиционные методы изучения ходьбы практически неосуществимы у пациентов, передвигающихся в экзоскелете.

Таким больным крайне сложно провести видеонализ движений, поскольку данный метод предполагает наклеивание маркеров, выполнение определенных движений, построение 3D-модели. Такие пациенты абсолютно не способны выполнить упражнения, необходимые для построения 3D-модели. Требования к оценке ходьбы в экзоскелете пациентов, не способных к самостоятельному передвижению, – максимальная информативность, но в то же время обследование должно быть непродолжительным и не вызывать утомления. С нашей точки зрения, этим требованиям могут соответствовать сенсорные силоизмерительные стельки *Tekscan*.

Посредством силоизмерительных стелек исследовали основные параметры ходьбы (скорость, темп, длину двойного шага, длительность локомоторного цикла), временные параметры шага (длительность опорной, переносной и двуопорной фаз, интервала τ , коэффициент ритмичности), динамические параметры (вертикальную составляющую R_z опорной реакции) и распределение давления под стопой. По сравнению с традиционной динамометрией применение силоизмерительных стелек позволяет регистрировать вертикальную составляющую R_z опорной реакции в каждом шаге, что дает возможность получить данные по множеству шагов.

В то же время при использовании тензометрической платформы можно зарегистрировать опорные реакции только одного шага за весь проход вне зависимости от его длины. Исследование большого количества опорных реакций позволяет провести детальную обработку результатов и получить коэффициент вариативности – необходимый параметр для оценки степени освоения ходьбой в экзоскелете, проанализировать изменения устойчивости и опороспособности по мере адаптации пациента к ходьбе в экзоскелете, проследить влияние сочетания тренировки в экзоскелете с другими методами реабилитации, а именно с чрескожной электрической стимуляцией спинного мозга или с функциональной электрической стимуляцией мышц [10, 11].

РЕЗУЛЬТАТЫ

При ходьбе здоровых испытуемых по горизонтальной поверхности произвольный темп составляет 99 шагов в минуту, длина двойного шага – 1,42 м, а средняя скорость ходьбы – 1,17 м/с, или 4,4 км/ч (табл. 1). При ходьбе здоровых обученных людей в экзоскелете средняя скорость передвижения составляет 0,22 м/с, или 0,79 км/ч, длина двойного шага – 0,66 м, а темп ходьбы – 40 шаг/мин.

При ходьбе здоровых людей по горизонтальной поверхности длительности опорной фазы составляют 62,4 и 62,7% цикла, переносной фазы – 37,6 и 37,3% цикла, двуопорной фазы – 12,7 и 12,4% (табл. 2). У здоровых людей в фазе опоры различают три интервала: опору на задний отдел стопы (пяtku), опору на всю стопу и опору на ее передний отдел (носок).

Относительные длительности этих интервалов для обеих ног выглядят следующим образом: 11,0 и 12,0%, 29,6 и 29,6%, 21,8 и 21,1%. Особый интерес представляет интервал τ , измеряемый временем от момента окончания опоры на всю стопу одной ноги до начала опоры другой ноги. Длительность интервала τ равна для правой и левой ног соответственно 9,3 и 9,0%.

Это означает, что при ходьбе в норме существует достаточно большой запас устойчивости, благодаря которому человек может удерживать равновесие, стоя на переднем отделе стопы одной из конечностей, выдвинув общий центр масс тела вперед. При ходьбе в экзоскелете длительность опорной фазы составляет для левой и правой ног 71 и 69,3%, а длительность переносной фазы соответственно 29 и 30,7%.

При этом длительность двуопорной фазы возрастает до 18–22,3% на обеих ногах. Увеличение длительности двуопорной фазы при ходьбе в экзоскелете

Таблица 1

**Основные параметры ходьбы здоровых испытуемых
без экзоскелета и в экзоскелете ($p < 0,05$)**

Параметр ходьбы	Ходьба без экзоскелета ($n = 5$)	Ходьба в экзоскелете ($n = 5$)	
	$M \pm m$	$M \pm m$	%
Длина двойного шага, м	$1,42 \pm 0,02$	$0,66 \pm 0,03$	46
Длительность цикла, с	$1,21 \pm 0,03$	$3,00 \pm 0,02$	248
Скорость ходьбы, м/с	$1,17 \pm 0,03$	$0,22 \pm 0,02$	19
Темп ходьбы, шаг/мин	99 ± 1	40 ± 1	40

Таблица 2

**Временные параметры ходьбы здоровых испытуемых
без экзоскелета и в экзоскелете**

Параметр	Ходьба без экзоскелета ($n = 5$)		Ходьба в экзоскелете ($n = 5$)					
	левая	правая	левая			правая		
	$M \pm m$	$M \pm m$	$M \pm m$	%	p	$M \pm m$	%	p
Длительность опорной фазы, %	$62,4 \pm 0,5$	$62,7 \pm 0,5$	$71,0 \pm 0,6$	114	$< 0,05$	$69,3 \pm 0,8$	111	$< 0,05$
Длительность переносной фазы, %	$37,6 \pm 0,4$	$37,3 \pm 0,4$	$29,0 \pm 0,6$	77	$< 0,05$	$30,7 \pm 0,9$	82	$< 0,05$
Длительность двуопорной фазы, %	$12,7 \pm 0,4$	$12,4 \pm 0,4$	$18,0 \pm 1,0$	142	$< 0,05$	$22,3 \pm 1,1$	180	$< 0,05$
Коэффициент ритмичности	$0,99 \pm 0,01$	–	$0,73 \pm 0,01$	74	$< 0,05$	–		
τ -интервал	$9,0 \pm 1,2$	$9,3 \pm 1,4$	$-12,7 \pm 2,4$	–	$< 0,05$	$-7,6 \pm 2,4$	–	$< 0,05$

у здоровых людей связано, во-первых, с увеличением длительности локомоторного цикла, а во-вторых, с использованием костылей, перенос и опора на которые требуют дополнительного времени. При ходьбе здоровых людей в экзоскелете можно выделить фазу опоры на передний отдел стопы.

Длительность этой фазы составляет 9,6% на левой ноге и 10,4% на правой. Наличие фазы опоры на носок позволяет определить интервал τ при ходьбе в экзоскелете. В данном случае интервал τ принимает отрицательное значение. Это означает, что отрыв пятки одной ноги происходит только тогда, когда другая нога уже устойчиво встала на опору. Длительность интервала τ составляет для левой ноги 12,7%, для правой – 7,6%.

Динамические параметры ходьбы

При обычной ходьбе по горизонтальной поверхности вертикальная составляющая R_z опорной реакции имеет двухвершинную форму с четко выраженными передним и задним толчками и симметрично расположенным минимумом (рис. 1). Экстремум переднего толчка приходится на 17–18% цикла, заднего толчка – на 51% цикла, минимум приурочен к 30% цикла (табл. 3). Величина переднего толчка составляет 119%, минимума – 72%, заднего толчка – 126%. Как видно, экстремальные значения R_z располагаются намного выше уровня веса тела.

Вертикальная составляющая R_z у здоровых людей при ходьбе в экзоскелете сохраняет двухвершинную форму, однако отмечается сдвиг всех экстремальных значений вправо по временной оси (см. рис. 1). Передний толчок возникает на уровне 27% цикла, минимум – на уровне 39%, задний толчок – на уровне 58% цикла.

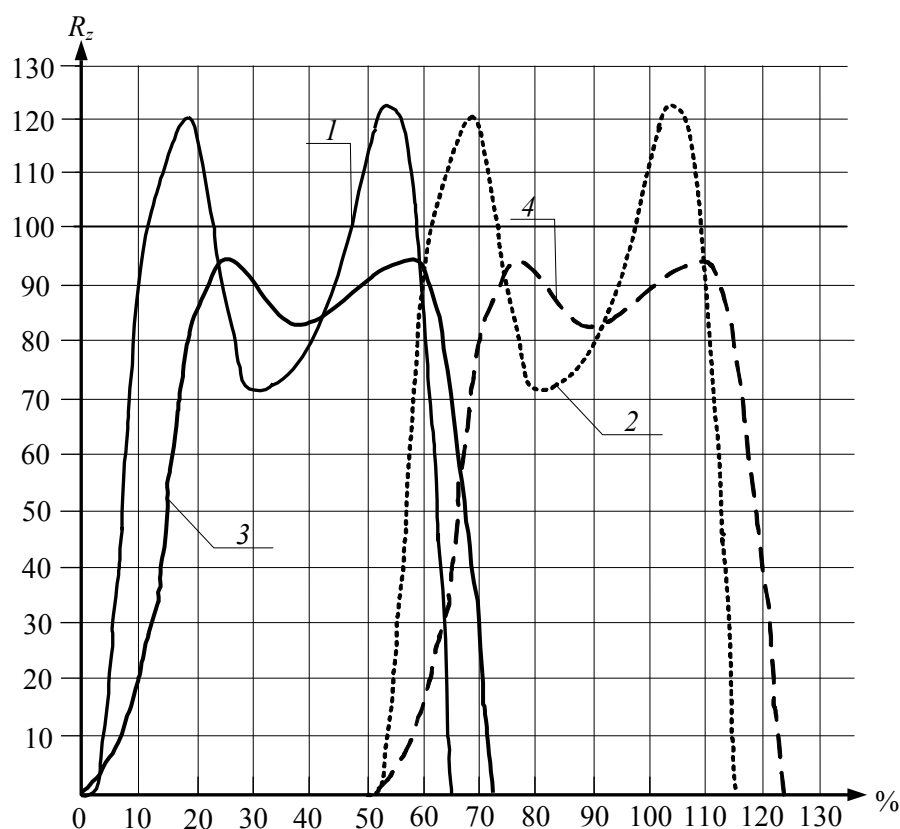


Рис. 1. Вертикальная составляющая R_z опорной реакции в процентах от локомоторного цикла при ходьбе здоровых испытуемых по горизонтальной поверхности без экзоскелета и в экзоскелете. На оси ординат – R_z , % к весу тела, на оси абсцисс – длительность цикла, %. Сплошная линия 1 – R_z -составляющая опорной реакции левой ноги при ходьбе без экзоскелета; линия 2 – R_z -составляющая опорной реакции правой ноги при ходьбе без экзоскелета (точечный пунктир); линия 3 – R_z -составляющая опорной реакции левой ноги при ходьбе в экзоскелете (жирная сплошная линия); линия 4 – R_z -составляющая опорной реакции правой ноги при ходьбе в экзоскелете (жирная пунктирная линия)

Таблица 3

Динамические параметры ходьбы здоровых испытуемых без экзоскелета и в экзоскелете ($p < 0,05$)

Параметр	Ходьба без экзоскелета ($n = 5$)		Ходьба в экзоскелете ($n = 5$)	
	$M \pm m$		$M \pm m$	%
Передний толчок	$119,0 \pm 4,3$		$94,1 \pm 3,8$	79
Минимум	$72,0 \pm 3,2$		$84,4 \pm 3,2$	117
Задний толчок	$126,0 \pm 5,2$		$94,4 \pm 3,2$	75

Экстремальные значения резко снижены: величина переднего толчка составляет 94%, минимума – 84%, заднего толчка – 94%. При ходьбе здоровых обученных людей в экзоскелете так же, как при ходьбе без экзоскелета, минимум R_z -кривой возникает в одноопорную фазу, т.е. во время переносной фазы контралатеральной ноги (табл. 3, рис. 1).

Исследования 6 пациентов с полной нижней параплегией вследствие травмы спинного мозга показали, что основные параметры ходьбы при передвижении в экзоскелете незначительно снижены по сравнению с параметрами у здоровых людей: средняя длина двойного шага уменьшена на 15% (0,56 м), а средняя скорость передвижения – на 14% (0,68 км/ч), темп ходьбы у здоровых и больных одинаковый – 40 шаг/мин (табл. 4).

Также отмечается трансформация временной структуры шага (табл. 5), а именно увеличение длительности опорной фазы на 12–17% (79,4 и 80,9%) и, соответственно, уменьшение продолжительности переносной фазы на 29–38% (20,6 и 19,1%). На обеих ногах длительность двуопорной фазы значительно возрастает – на 68–35% (30,2 и 30,1%).

Таблица 4

Основные параметры ходьбы в экзоскелете у здоровых испытуемых и у больных с травмой спинного мозга

Параметр ходьбы	Норма (n = 5)	Больные (n = 5)		
	$M \pm m$	$M \pm m$	%	p
Длина двойного шага, м	0,66 ± 0,03	0,56 ± 0,03	85	< 0,05
Длительность цикла, с	3,00 ± 0,02	3,00 ± 0,02	100	> 0,05
Скорость ходьбы, м/с	0,22 ± 0,02	0,19 ± 0,02	86	< 0,05
Темп ходьбы, шаг/мин	40 ± 1	40 ± 1	100	> 0,05

Таблица 5

Временные параметры ходьбы в экзоскелете у здоровых испытуемых и у больных с травмой спинного мозга

Параметр	Здоровые (n = 5)		Больные (n = 5)					
	левая	правая	левая			правая		
	$M \pm m$	$M \pm m$	$M \pm m$	%	p	$M \pm m$	%	p
Длительность опорной фазы, %	71,0 ± 0,5	69,3 ± 1,1	79,4 ± 1,2	112	< 0,05	80,9 ± 1,3	117	< 0,05
Длительность переносной фазы, %	29,0 ± 0,5	30,7 ± 1,1	20,6 ± 1,2	71	< 0,05	19,1 ± 1,3	62	< 0,05
Длительность двуопорной фазы, %	18,0 ± 0,9	22,3 ± 1,7	30,2 ± 1,4	168	< 0,05	30,1 ± 1,6	135	< 0,05
Коэффициент ритмичности	0,81	–	0,93	115	–	–	–	–

В наибольшей степени изменяются динамические параметры ходьбы, а именно вертикальная составляющая R_z опорной реакции (рис. 2, табл. 6). Вертикальная составляющая опорной реакции утрачивает двухвершинную форму (см. рис. 2). Все экстремальные значения R_z -составляющей резко снижаются по сравнению с нормой на обеих ногах и не выходят за пределы уровня веса тела.

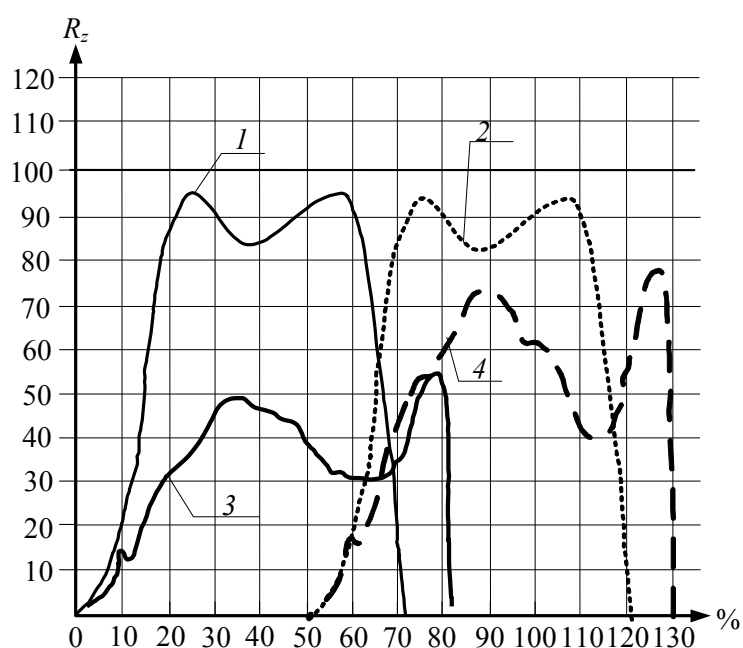


Рис. 2. Вертикальная составляющая опорной реакции R_z при ходьбе в экзоскелете у здоровых испытуемых и у пациентов с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы. Сплошная линия 1 и точечный пунктир 2 – R_z -составляющая опорной реакции левой (1) и правой (2) ног у здоровых испытуемых; жирная сплошная линия (3) и жирная пунктирная линия (4) – R_z -составляющая опорной реакции левой (3) и правой (4) ног при ходьбе больных. Остальные обозначения те же, что на рис. 1

Таблица 6

Динамические параметры ходьбы в экзоскелете у здоровых испытуемых и у больных с травмой спинного мозга

Параметр	Здоровые ($n = 5$)		Больные ($n = 5$)					
	левая	правая	левая			правая		
	$M \pm m$	$M \pm m$	$M \pm m$	%	p	$M \pm m$	%	p
Передний толчок	$94,1 \pm 3,8$	$94,1 \pm 3,8$	$49,6 \pm 3,5$	53	$< 0,05$	$76,2 \pm 3,2$	81	$< 0,05$
Минимум	$84,4 \pm 3,2$	$84,4 \pm 3,2$	$29,7 \pm 1,5$	35	$< 0,05$	$40,6 \pm 2,8$	48	$< 0,05$
Задний толчок	$94,4 \pm 3,2$	$94,4 \pm 3,2$	$51,6 \pm 2,0$	55	$< 0,05$	$73,4 \pm 4,5$	78	$< 0,05$

Отмечается четкая асимметрия динамических параметров. В кривой R_z наблюдается резкий сдвиг всех экстремальных значений вправо по временной оси. Передний толчок (величиной 49% на левой ноге и 76% на правой) развивается лишь к $t = 38\%$ цикла, затем возникает замедленный переход к минимуму, на уровне $t = 62\%$ цикла (величины соответственно 30 и 41%), и наконец очень быстрое развитие заднего толчка, на уровне $t = 77\%$ цикла (величины 52 и 73%). Можно полагать, что на начальном этапе освоения экзоскелета больные должны увеличить продолжительность переднего толчка, чтобы обеспечить некоторую опороспособность.

Таким образом, для ходьбы больных с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы в экзоскелете характерны уменьшение скорости и длины шага, значительное снижение устойчивости, грубая трансформация временной структуры шага (увеличение длительности опорной и двуопорной фаз и резкое уменьшение длительности переносной фазы, невозможность выделить фазу опоры на носок и, следовательно, интервал τ), утрата двухвершинной формы вертикальной составляющей, значительное снижение экстремальных значений и их более резкое смещение вправо по временной оси по сравнению со здоровыми людьми.

Всем больным был проведен курс чрескожной электрической стимуляции спинного мозга при ходьбе в экзоскелете. Курс включал 12–15 тренировок с суммарным временем стимуляции 735 минут при продолжительности ходьбы 316 минут. В начале курса для ходьбы пациентам требовалась помощь двух ассистентов, после 3–4 сеансов они демонстрировали относительно стабильную ходьбу с чрескожной электрической стимуляцией спинного мозга и опорой на локтевые костыли с одним сопровождающим.

Начиная с 6-го занятия тренировки ходьбы в экзоскелете сопровождались низкочастотной стимуляцией средней части поясничного утолщения спинного мозга с расположением электродов на коже (–) – над позвонком *Th12*, (+) – центрально на передней брюшной стенке. Стимуляцию проводили с помощью портативного электростимулятора. Одному пациенту из-за гипертонуса в мышцах ног (4 балла) по шкале *Ashworth*, ограничивающего ходьбу с электрической стимуляцией, режим электростимуляции был изменен на противоспастический (30 и 67 имп/с) с той же зоной приложения чрескожной электрической стимуляции спинного мозга [11].

КЛИНИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Включение чрескожной электрической стимуляции спинного мозга не оказывало дестабилизирующего влияния на ходьбу в экзоскелете. Субъективно пациенты отмечали эффект облегчения ходьбы; длительность ходьбы в экзоскелете без остановок существенно возросла у 5 пациентов. Пациент с высокой спастической активностью под действием противоспастической чрескожной электрической стимуляции спинного мозга увеличил количество проходимых шагов с 3–4 до 11 с последующим дальнейшим прогрессом.

После интенсивного курса тренировок в экзоскелете в сочетании с чрескожной электрической стимуляцией спинного мозга у 4 из 6 пациентов увеличилась болевая и тактильная чувствительность (на 3–6 баллов по шкале *ASIA* каждая), все 6 пациентов отмечали появление парестезий в ногах ниже зоны анестезии, появление ощущения пассивных движений в суставах (без различения направления) и «чувства опоры» при стоянии. Увеличения силы мышц при тестировании в стандартных положениях не было выявлено. У пациента с неполной параплегией существенно улучшились локомоторные возможности – от 2–3 шагов в ходунках в начале курса до 30 м к его окончанию. Скорость ходьбы увеличилась с 0,13 м/с в начале курса до 0,25 м/с к его окончанию, длина двойного шага – с 0,3 до 0,62 м.

После курса тренировки ходьбы в экзоскелете отмечаются незначительные изменения временной структуры шага (табл. 7). На левой ноге наблюдается некоторое уменьшение длительности переносной фазы. Таким образом, временная структура ходьбы у больных с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы остается весьма стабильной и мало изменяется даже после курса комплексной реабилитации, включающей тренировку ходьбы в экзоскелете в сочетании с электрической стимуляцией спинного мозга.

Таблица 7

**Временные параметры ходьбы в экзоскелете у больных с травмой спинного мозга
до и после курса реабилитации**

Параметр	До курса ($n = 5$)		После курса ($n = 5$)					
	левая	правая	левая			правая		
	$M \pm m$	$M \pm m$	$M \pm m$	%	p	$M \pm m$	%	p
Длительность опорной фазы, %	$79,4 \pm 1,2$	$80,9 \pm 1,3$	$82,3 \pm 0,8$	104	$> 0,05$	$81,3 \pm 1,4$	100	$> 0,05$
Длительность переносной фазы, %	$20,6 \pm 1,2$	$19,1 \pm 1,3$	$17,7 \pm 0,8$	86	$> 0,05$	$18,7 \pm 1,4$	98	$> 0,05$
Длительность двуопорной фазы, %	$30,2 \pm 1,4$	$30,1 \pm 1,6$	$32,0 \pm 1,2$	106	$> 0,05$	$31,6 \pm 1,6$	105	$> 0,05$
Коэффициент ритмичности	$0,93 \pm 0,01$	–	$0,99 \pm 0,01$	106	$> 0,05$	–		

После 10-дневного курса тренировки ходьбы в экзоскелете наблюдается изменение формы вертикальной составляющей опорной реакции на обеих ногах (рис. 3). Вертикальная составляющая R_z приобретает отчетливую двугорбую форму с четко выраженными максимумами. При этом практически исчезает динамическая асимметрия, т.е. величина экстремальных значений становится примерно одинаковой на обеих ногах (табл. 8).

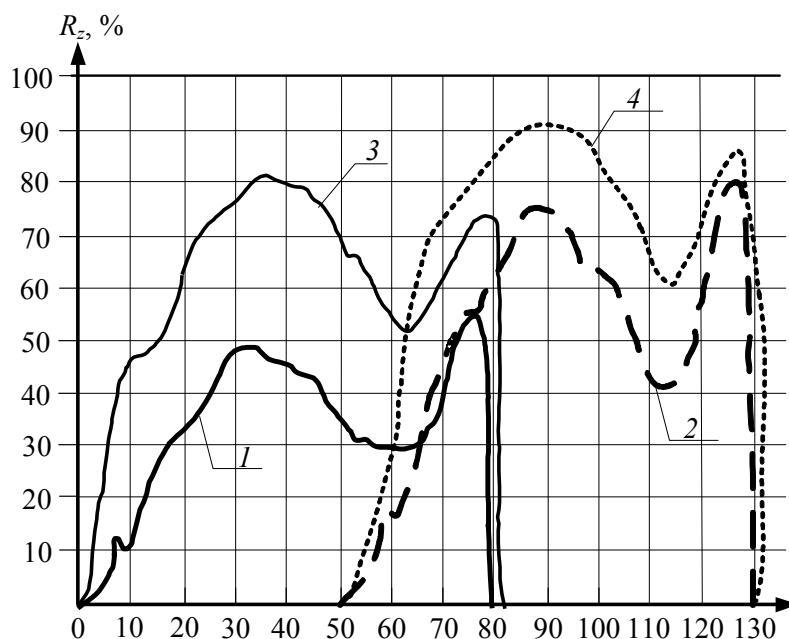


Рис. 3. Вертикальная составляющая R_z опорной реакции при ходьбе в экзоскелете больных с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы до и после курса реабилитации: 1 и 2 – ходьба до курса, 3 и 4 – ходьба после курса; 1 и 3 – левая нога, 2 и 4 – правая нога. Остальные обозначения – те же, что и на рис. 2

Таблица 8

Динамические параметры ходьбы в экзоскелете у больных с травмой спинного мозга до и после курса реабилитации

Параметр	До курса ($n = 5$)		После курса ($n = 5$)					
	левая	правая	левая			правая		
	$M \pm m$	$M \pm m$	$M \pm m$	%	p	$M \pm m$	%	p
Передний толчок	49,6 ± 3,5	76,2 ± 3,2	80,3 ± 3,3	162	< 0,05	87,1 ± 3,2	114	< 0,05
Минимум	29,7 ± 1,5	40,6 ± 2,8	54,9 ± 2,2	185	< 0,05	65,2 ± 3,6	161	< 0,05
Задний толчок	51,6 ± 2,0	73,4 ± 4,5	75,2 ± 2,9	146	< 0,05	86,2 ± 3,7	117	> 0,05

Отмечается резкое увеличение всех максимальных значений опорных реакций. По сравнению с исходными данными величина переднего толчка на левой ноге возрастает на 62% (80,3%), минимума – на 85% (54,9%), заднего толчка – на 46% (75,2%). На правой ноге наблюдается меньший прирост амплитуды по сравнению с левой ногой, величина переднего и заднего толчков возрастает на 14–17% по сравнению с исходными данными (соответственно 87,1 и 86,2%), а минимума – на 61% (65,2%).

Таким образом, основной эффект курса комплексной реабилитации, сочетающей ходьбу в экзоскелете с электрической стимуляцией спинного мозга, состоит в значительном улучшении динамических параметров ходьбы, а именно в появлении двухвершинной формы вертикальной составляющей, сдвиге всех экстремальных значений влево по временной оси, в уменьшении времени опоры на костыли; в высокой степени овладения навыком ходьбы в экзоскелете (увеличение амплитуды переднего и заднего толчков и появление четкого минимума между ними); в значительном повышении устойчивости при ходьбе.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как уже было выше упомянуто, большинство специалистов, занимающихся реабилитацией пациентов с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы посредством применения экзоскелета, полагают, что для оценки формирования навыка ходьбы в экзоскелете достаточно качественного клинического подхода. Количественные показатели сводятся к подсчету шагов во время каждого сеанса, к измерению длительности сеанса и чистого времени ходьбы в скелете, к показателям центральной гемодинамики [12, 13, 15, 17, 18]. В аспекте качественного клинического подхода изучения ходьбы в экзоскелете особенный интерес представляет классификация *D. Fineberg* [14]. По мнению *D. Fineberg*, всех пациентов с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы можно разделить на четыре группы по степени овладения навыком ходьбы в экзоскелете. Первую группу составляют пациенты, которым необходима максимальная поддержка ассистента, в частности тренер держит обе руки на тазовом ремне устройства и обеспечивает значительное и частое перемещение веса тела и поддержание устойчивости пациента в течение большей части двигательной активности. Вторую группу составляют пациенты, которым требуется умеренная помощь. В данном случае тренер держит обе руки на тазовом поясе пациента или другой части устройства и периодически обеспечивает перемещение веса и (или) поддержание устойчивости пациента во время

движения. Третью группу составляют пациенты, которым требуется минимальная помощь. Тренер держит одну руку на устройстве и периодически обеспечивает поддержание устойчивости. Наконец, четвертую группу составляют пациенты, которым не требуется помощь ассистента. Тренер не удерживает пациента даже одной рукой, но находится рядом с пациентом в течение всего сеанса, чтобы в случае необходимости оказать больному помощь. Как видно, данная классификация не дает ответов на следующие вопросы:

1) Какие изменения происходят в биомеханической структуре ходьбы в экзоскелете у пациентов с полной нижней параплегией в процессе многодневной тренировки?

2) Какие критерии свидетельствуют о формировании навыка ходьбы в экзоскелете?

3) Можно ли на основании данной классификации выявить реабилитационный потенциал конкретного больного?

Действительно, с помощью клинических исследований невозможно проследить формирование навыка ходьбы в экзоскелете в процессе многодневной тренировки. Необходимо отметить, что *D. Fineberg* сам сделал первую попытку инструментальной оценки ходьбы в экзоскелете. В частности, он впервые показал необходимость проведения инструментальной оценки ходьбы в экзоскелете. Однако автор сопоставляет ходьбу здоровых людей без экзоскелета с ходьбой в экзоскелете у пациентов двух групп с позвоночно-спинномозговой травмой, в частности, у пациентов, которые ходят с минимальной поддержкой, и у тех, кто может ходить без поддержки. Автор отмечает, что у пациентов с травмой спинного мозга амплитуда экстремальных значений переднего и заднего толчков снижена по сравнению со здоровыми людьми. Однако такое сравнение является неправомерным, поскольку здоровые люди ходят без экзоскелета, а больные – в экзоскелете. С нашей точки зрения, биомеханическая структура ходьбы пациентов и здоровых испытуемых должна осуществляться в одинаковых условиях, т.е. при ходьбе в экзоскелете. Это связано с тем, что данные больные не могут передвигаться без экзоскелета. Следовательно, целью освоения навыков ходьбы в экзоскелете для таких пациентов является максимальное приближение их параметров ходьбы к параметрам ходьбы здоровых испытуемых в экзоскелете. Тем не менее, с нашей точки зрения, наибольший интерес представляют два последних вопроса, а именно, критерий образования правильного стереотипа при ходьбе в экзоскелете и проблема нахождения потенциала реабилитации у пациентов с полным параличом нижних конечностей.

Судя по осредненным данным, временная структура ходьбы практически не изменяется после курса тренировки. Между тем и больные, и их родственники, и врачи, работающие с пациентами, отмечают значительное улучшение их состояния, а именно большую устойчивость при ходьбе, возможность стоять более продолжительное время, способность пройти большее расстояние в экзоскелете с меньшим утомлением. Однако по клиническим данным и по данным различных шкал после курса отмечаются очень незначительные изменения. Из этого можно сделать вывод, что клинические шкалы не являются тонким инструментом отслеживания формирования навыка ходьбы в экзоскелете в процессе многодневной тренировки. Помимо этого, клинические шкалы не позволяют проследить влияние комплексной реабилитации, включающей, в частности, ходьбу в экзоскелете с чрескожной электрической стимуляцией спинного мозга или с функциональной электрической стимуляцией мышц. Это связано с тем, что такая комплексная реабилитация требует определения одномоментного влияния того или иного вида стимуляции в течение сеанса ходьбы в экзоскелете.

Наши исследования показали, что у двух больных выявляется существенное улучшение временных и динамических параметров ходьбы уже в первый день реабилитации непосредственно под влиянием стимуляции спинного мозга.

В частности, при ходьбе в экзоскелете у пациента Р-ко в сочетании со стимуляцией спинного мозга уже во время первого пробного сеанса отмечается снижение длительности опорной фазы на 9% на обеих ногах, значительное возрастание длительности переносной фазы: на правой ноге – на 54%, а на левой – на 46%.

Наряду с этим уменьшается длительность двуопорной фазы, на левой ноге на 14%, а на правой ноге – на 28%. Уменьшение продолжительности двуопорной фазы свидетельствует об увеличении опороспособности обеих нижних конечностей и повышении устойчивости больного при тренировке в экзоскелете в сочетании с электрической стимуляцией спинного мозга. Можно полагать, что снижение длительности двуопорной фазы связано с уменьшением периода опоры на костыли.

Уже во время первого сеанса происходят отчетливые изменения вертикальной составляющей R_z опорной реакции на обеих ногах. На левой ноге амплитуда переднего толчка возрастает на 13% (80%), минимума – на 24% (36%), а задний толчок остается без изменений. На правой ноге незначительно увеличивается амплитуда переднего и заднего толчков, соответственно на 14% (96%) и 26% (75%). Отмечается сдвиг всех экстремальных значений влево по временной оси.

Полученные результаты даже одного больного позволяют выявить критерии улучшения биомеханической структуры ходьбы в экзоскелете под влиянием первого сеанса электрической стимуляции спинного мозга.

Можно полагать, что даже незначительное улучшение структуры ходьбы во время первого сеанса дает основание для благоприятного прогноза. С нашей точки зрения, такими критериями являются следующие:

- уменьшение длительности опорной и двуопорной фаз;
- увеличение длительности переносной фазы;
- появление двухвершинной формы вертикальной составляющей опорной реакции;
- увеличение амплитуды переднего и заднего толчков;
- сдвиг экстремальных значений опорной реакции влево по временной оси;
- уменьшение длительности опоры на костыли;
- появление фазы опоры на всю стопу.

Дальнейшие исследования ходьбы в экзоскелете у данного контингента больных должны быть направлены на изучение работы мышц при тренировке в экзоскелете, определение энерготрат, выявление отдаленных результатов комплексной реабилитации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для биомеханической структуры ходьбы в экзоскелете у больных с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы с нижней параплегией характерны увеличение длительности опорной и двуопорной фаз, снижение длительности переносной фазы, утрата двухвершинной формы вертикальной составляющей опорной реакции, сдвиг всех экстремальных значений вправо по временной оси, резкое снижение величины переднего и заднего толчков вертикальной составляющей опорной реакции.

2. Одним из наиболее эффективных методов реабилитации пациентов с полной нижней параплегией является сочетание ходьбы в экзоскелете с чрескожной электрической стимуляцией поясничного утолщения спинного мозга.

3. Под влиянием курса комплексной реабилитации, включающей ходьбу в экзоскелете в сочетании с чрескожной электрической стимуляцией спинного мозга у больных с полной нижней параплегией, отмечается незначительное изменение временных параметров и существенное улучшение динамических параметров ходьбы, что проявляется в изменении формы R_2 -кривой, в исчезновении асимметрии, увеличении экстремальных значений и их сдвиге влево по временной оси, в уменьшении времени опоры на костыли.

4. Даже незначительные положительные изменения во временной и динамической структуре ходьбы под влиянием электрической стимуляции спинного мозга являются благоприятными критериями и могут быть использованы для выявления реабилитационного потенциала и в последующем – для реабилитационного прогноза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бодрова Р.А. Комплексное восстановительное лечение лиц, перенесших травму спинного мозга // Актуальные вопросы восстановительной медицины и реабилитации больных с двигательными нарушениями: материалы межрегион. науч.-практ. конф. – Н. Новгород, 2009. – С. 106–107.
2. Витензон А.С., Миронов Е.М., Петрушанская К.А., Скоблин А.А. Искусственная коррекция движений при патологической ходьбе. – М.: Зеркало, 1999. – 503 с.
3. Витензон А.С., Петрушанская К.А. От естественного к искусственному управлению локомоциями. – М.: НМФ МБН, 2003. – 448 с.
4. Гриценко Г.П., Витензон А.С. Биомеханические критерии оценки нарушения ходьбы при патологическом состоянии опорно-двигательного аппарата // Юбилейная научно-практическая конференция, посвященная 75-летию Центрального научно-исследовательского института экспертизы, трудоспособности и организации труда инвалидов ЦИЭТИН. – М., 2005. – С. 65–67.
5. Даминов В.Д., Зимица Е.Ю., Рыбалко Н.В., Кузнецов А.Н. Роботизированные технологии восстановления функции ходьбы в нейрореабилитации. – М.: РАЕН, 2010. – 128 с.
6. Даминов В.Д., Письменная Е.В., Горохова И.Г., Шаталова О.Г., Родыгин М.А., Даминова И.О., Карташов А.В., Уварова О.А., Ткаченко П.В. Применение экзоскелета «Экзоатлет» в клинической практике: метод. пособие / под редакцией академика РАМН Ю.Л. Шевченко. – М., 2016. – 36 с.
7. Епифанов В.А., Епифанов А.В., Баринев А.Н. Восстановительное лечение при заболеваниях и повреждениях позвоночника. – М.: МЕДпресс-информ, 2016. – 373 с.
8. Коновалова Н.Г. Восстановление вертикальной позы инвалидов с нижней параплегией. – Новокузнецк, 2006. – 200 с.
9. Миронов Е.М., Витензон А.С., Петрушанская К.А. Восстановительное лечение больных с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы. – Тверь, 2009. – 228 с.
10. Письменная Е.В., Петрушанская К.А., Шапкова Е.Ю. Инструментальная оценка ходьбы в экзоскелете // Технологические инновации в травматологии, ортопедии и нейрохирургии: интеграция науки и практики: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Саратов, 2017. – С. 273–276.
11. Шапкова Е.Ю., Письменная Е.В. Чрескожная электростимуляция спинного мозга при ходьбе в экзоскелете у пациентов с плегиями // Технологические инновации в травматологии, ортопедии и нейрохирургии: интеграция науки и практики: материалы всерос. науч.-практ. конф. – Саратов, 2017. – С. 339–342.
12. del Ama A.J., Koutsou A.D., Moreno J.C., de-los Reyes A., Gil-Agudo A., Pons J.L. Review of hybrid exoskeletons to restore gait following spinal cord injury // Journal of Rehabilitation Research and Development. – 2012. – Vol. 49 – P. 497–514.
13. Esquenazi A., Talaty M., Packer A., Saulino M. The *ReWalk* powered exoskeleton to restore ambulatory function to individual with thoracic-level motor-complete spinal cord injury // Am. J. Phys. Med. Rehabil. – 2012. – Vol. 91. – P. 911–921.
14. Fineberg D.B., Asselin P., Harel N.Y., Agranova-Breyter I., Kornfeld S.D., Bauman W.A., Spungen A.M. Vertical ground reaction force-based analysis of powered exoskeleton-assisted walking in persons with motor-complete paraplegia // The Journal of Spinal Cord Medicine. – 2013. – Vol. 36, № 4. – P. 313–321.
15. Hartigan C., Kandilakis G., Dalley S., Clausen M., Wilson E., Morrison S., Ethridge S., Farris R. Mobility outcomes, following five training sessions with a powered exoskeleton // Top. Spinal Cord Injury Rehabilitation. – 2015 – Vol. 21, № 2. – P. 93–99.
16. Kozłowski A.J., Bryce T.N., Dijkers M.P. Time and effort, required by persons with spinal cord injury to learn to use a powered exoskeleton for assisted walking // Spinal Cord Injury Rehabilitation. – 2015. – Vol. 21, № 12. – P. 110–121.

17. Raab K., Krakow K., Tripp F., Jung M. Effects of training with the ReWalk exoskeleton on quality of life in incomplete spinal cord injury: a single case study // Spinal Cord Series and Cases. – 2016. – Vol. 3 – 15025.
18. Zeilig G., Weingarden H., Zwecker M., Dudkiewicz I., Bloch A., Esquenazi A. Safety and tolerance of the Rewalk exoskeleton suit for ambulation by people with complete spinal cord injury: a pilot study // The Journal of Spinal Cord Medicine. – 2012. – Vol. 35, № 2. – P. 96–101. DOI: 10.1179/2045772312Y.0000000003

CRITERIA OF MASTERING THE SKILLS OF WALKING IN THE EXOSKELETON IN PATIENTS WITH CONSEQUENCES OF SPINAL CORD INJURIES

**E.V. Pismennaya, K.A. Petrushanskaya (Moscow, Russia),
E.Yu. Shapkova (St. Petersburg, Russia)**

The problem of rehabilitation of patients with consequences of spinal cord injury by means of application of the exoskeleton is considered in this article for the first time in Russia. Authors of this article propose a new method of rehabilitation of this contingent of patients – walking in the exoskeleton. This method permits to enlarge considerably the contingent of the disabled people, otherwise to apply this device not only in patients with paraparesis of the lower extremities, but also in patients with complete paraplegia. Authors consider combination of training in the exoskeleton with transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord to be one of the most effective methods of rehabilitation of such patients. Authors revealed distinctions of the biomechanical structure of walking in exoskeleton of healthy people and patients with the spinal cord injury, and, besides, they determined the method of application of transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord in combination with training of walking in the exoskeleton. Pain and tactile sense increased in 4 from 6 patients after the intensive course of training in the exoskeleton in combination with transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord. All 6 patients noted appearance of paresthesia in legs lower zone of anesthesia, appearance of sensation of the passive movements at the joints and “sense of the support”. It has been revealed that the following positive changes take place as a result of 10-days training of walking in the exoskeleton in combination with transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord: growth of stability, increase of the support and push functions of the lower extremities, change of the form of the vertical component of the ground reaction force, decrease of the time of the support on crutches. For all this, in 2 of 6 patients improvement of walking takes place during the first trial session of walking in the exoskeleton in combination with transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord, in particular, change of the temporal structure of the step (reduction of duration of the stance and double-support phases and increase of duration of the swing phase, diminution of duration of the support on crutches), inconsiderable increase of the amplitude of heel-strike and push-off. It is believed that even inconsiderable positive changes of the locomotor functions during the first session is a criterion of revealing the rehabilitation potential, and subsequently – of the rehabilitation prognosis.

Key words: exoskeleton, spinal-cord injury, rehabilitation, transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord, biomechanical structure of walking, vertical component of the ground reaction force.

Получено 12 февраля 2018