

КЛИНИЧЕСКАЯ ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ ЭКСОСКЕЛЕТОВ

УДК 616.78

Карпов О.Э., Ветшев П.С., Даминов В.Д., Ткаченко П.В.

*ФГБУ «Национальный медико-хирургический центр им. Н.И.Пирогова
Министерства здравоохранения РФ» Москва*

CLINICAL PRACTICE IN THE EXOSKELETON'S APPLICATION

Karpov O.E., Vetshev P.S., Daminov V.D., Tkachenko P.V.

*FSBE "National Medical Surgery Center named by N.I.Pirogov Ministry of Health RF"
Moscow*

Медицина высоких технологий на сегодняшний день является едва ли не самой динамично развивающейся отраслью, и ее трудно представить без глубокой интеграции в клиническую практику инновационного оборудования, созданного на основе последних научно-технических разработок. Многие специалисты подчеркивают, что органичный сплав телекоммуникационных, компьютерных, роботизированных, информационно-управленческих и других высоких технологий — отличительная черта ведущих медицинских центров. В последние годы все большее внимание при восстановлении двигательных функций уделяется внедрению роботизированных реабилитационных комплексов, а разработка подобных комплексов и методик их использования в лечебном процессе является одним из приоритетных направлений развития здравоохранения в развитых странах [1, 2, 3]. К подобным технологиям для восстановления функции ходьбы у пациентов с тяжелыми двигательными нарушениями относятся ассистирующие роботизированные экзоскелеты, позволяющие осуществлять физиологическую схему (паттерн) ходьбы по недвижущейся поверхности.

Как известно, экзоскелет (от греч. Ἔξω – внешний и σκελετός – скелет) — устройство, предназначенное для восполнения утраченных функций, увеличения силы мышц человека и расширения амплитуды движений за счет внешнего каркаса и приводящих элементов [4]. Основной площадкой разработок как и в прежние годы, остается применение этих устройств в военной промышленности. Первый экзоскелет был создан в 1960-е гг. совместно компаниями General Electric и United States military, и назывался Hardiman. Человек, облаченный в этот экзоскелет, мог поднимать груз массой 110 кг, при этом затрачивал усилие, равное примерно 45 Ньютонам. В то же время отмечено, что при массе в 680 кг конструкция была неэффективна.

Рабочие модели экзоскелетов были построены, но их широкое применение было невозможно. Это, например, экзоскелет XOS (Sarcos, США) создан для нужд армии США. Экзоскелет представляет собой специализированный костюм, предназначенный для военнослужащих полевых подразделений. У разработанного эк-

зоскелета есть существенный недостаток — конструкция требует постоянной связи с источником энергии. Масса конструкции 70 кг, что также ограничивает его применение [5, 6, 7].

Наиболее интересные практические результаты для военного применения продемонстрированы в Калифорнийском университете в Беркли. Проект под названием HULC (Human Universal Load Carrier) ставит целью создание экзоскелета, повышающего грузоподъемность и скорость передвижения солдат с полной боевой выкладкой. Образец уже позволяет переносить груз до 90 кг в течение 1 часа со средней скоростью почти 5 км/ч и возможностью кратковременных бросков со скоростью до 16 км/ч. Представленный образец экзоскелета получает энергию от двухкилограммовой литий-полимерной батареи. По сообщениям прессы HULC весит всего 25 кг, а снимается и надевается он в течение нескольких секунд. Разработчики HULC подчеркивают, что даже при «севших» батареях костюм все равно облегчает движения солдата, компенсируя удары и нагрузку. Эксплуатация устройства ограничивается климатическими условиями — высокой и низкой температурами. Обслуживание и ремонт HULCa могут проводить только специалисты [8, 9]. Таким образом, цель создания экзоскелетов в военной промышленности — это обеспечение брони, которая совмещает в себе огневую мощь и защиту, подвижность и скорость человека, и в несколько раз увеличивает силу того, кто использует экзоскелет.

Другим приоритетным направлением, где находят свое применение экзоскелеты, является медицинская реабилитация. Экзоскелеты используются для восстановления людей с ограниченными возможностями. По данным ВОЗ, ежегодно до 500 тысяч человек получают травму позвоночника, осложненную повреждением спинного мозга, и остаются тяжелыми инвалидами с неблагоприятным прогнозом восстановления ходьбы. В России позвоночно-спинномозговую травму получают около 8000 человек в год, приблизительно 70-80% из них остаются инвалидами 1 и 2 групп [10].

Наиболее тяжелыми последствиями травм спинного мозга являются центральные параличи и нарушение

функции ходьбы различной степени выраженности. При этом большинство пациентов являются лицами трудоспособного возраста, что еще в большей степени предопределяет социально-экономическую значимость проблемы [11, 12]. Длительность адаптации и физические затраты медицинского персонала явились предпосылкой к созданию роботизированных систем, сочетающих раннюю мобилизацию с двигательной активностью.

Утверждение, что «ходьба тренируется только в ходьбе» упоминается в многочисленных исследованиях. В последнее десятилетие для восстановления ходьбы широко применяются локомоторные ассистирующие роботы [13, 14]. Множество работ посвящено реабилитации пациентов с различными нозологиями в отдельно взятые периоды [15, 16, 17, 18] при использовании локомоторных стационарных роботов. Убедительно доказано, что многократно повторяющиеся, специальные локомоторные тренировки в роботизированных ортезах через механизмы нейропластичности позволяют улучшить функцию передвижения и повседневную двигательную активность у пациентов с неврологическими нарушениями [19]. В 2013 году доказана эффективность применения данных устройств у пациентов с двигательными нарушениями вследствие инсульта. Те пациенты, в реабилитации ходьбы которых использовались ассистирующие роботизированные тренировки на движущейся поверхности (беговом полотно) в комбинации с физиотерапией достигали лучших результатов в независимой ходьбе, чем пациенты, получавшие только традиционную терапию [20]. На основании проведенных исследований данные аппараты можно отнести к терапевтическим устройствам, ярким представителем которых является Lokomat.

Однако настоящей революцией в расширении безбарьерной среды для таких пациентов стало появление экзоскелетов, способных ходить по недвижущейся поверхности.

В странах, где придается важное значение социальной направленности внутренней политики, разработаны экзоскелеты, позволяющие восполнять утраченные функции и осуществлять физическую и социальную реабилитацию пациентов. На сегодняшний день известно пять иностранных экзоскелета: ReWalk, REX, HAL, Indego, Ekso.

ReWalk (ARGO Medical Technologies, Израиль). Позволяет людям с нижним парапарезом вставать на ноги и ходить по всем поверхностям, пандусам, лестницам, опираясь на трости. Работа конструкции ReWalk основана на датчиках, улавливающих наклон тела вперед и передающих сигнал к поддерживающим ноги приборам. Отличительными особенностями аппарата является небольшой вес аппарата - 25 кг; вес, ощущаемый пользователем - 2,5 кг. Питание осуществляется от аккумулятора, рассчитанного до 3х часов непрерывной ходьбы и размещенного в специальном рюкзаке за спиной. Время зарядки батареи - 5-8 часов. Сертифицировано FDA для домашнего (уровень повреждения Th7 и ниже) и стационарного (уровень повреждения Th4 и ниже) использования [21]. Исследования показывают, что частота сердечных сокращений, потребление кислорода изменяются адекватно предлагаемой нагрузке при ходьбе, подъеме и сидя в экзоскелете [22]. В клиническом случае у пациента 22 лет с неполным повреждением спинного мозга на уровне Th11 позвонка (по шкале Asia - C) в позднем периоде травмы (1 год)

был начат курс реабилитации с включением Rewalk. Уже через 6 месяцев занятий пациент мог самостоятельно передвигаться под контролем ассистента. Улучшились качество жизни, мобильность, двигательные навыки, газозовые функции, уменьшился риск падений [23].

REX (REX Bionics, Новая Зеландия). Обеспечивает дополнительную поддержку тела человека в пространстве при перемещении. Управление осуществляется при помощи джойстика и планшета. Вес экзоскелета — 38 кг. Экзоскелет может передвигаться по ровной поверхности и лестнице. Огромный вес аппарата и его высокая себестоимость делают его недоступным для массового применения и недостаточно данных по клиническому применению.

HAL, Hybrid Assistive Limb (Япония, Cyberdyne). Предназначен для пожилых людей и инвалидов, испытывающих затруднения в передвижении. Однако общий вес конструкции равен 23 кг, высота — 160 см. Кроме того, аккумуляторная батарея весит 10 кг, а время автономной работы (в условиях максимальной нагрузки) составляет 2,5 часа. Большинство исследований посвящено применению HAL для пациентов после инсульта. Положительный эффект показан в улучшении паттерна sit-to-stand (переход из положения сидя в положение стоя [24]), улучшении двигательных функций и ходьбы без увеличения спастичности и формирования неправильного стереотипа ходьбы.

В клиническом примере на двух пациентах в позднем периоде ПСМТ и невропатической болью показано, что использование HAL в течение 12 недель ежедневно способствует не только улучшению ходьбы, но и значительному снижению тяжести болевого синдрома и, как следствие, улучшению качества жизни [25]. А в результате эксперимента с участием больного с тяжелой ПСМТ устройство HAL позволило пациенту осуществлять симметричную ходьбу и произвольно регулировать скорость переноса ноги [26].

Indego (Parker Hannifin Corp., USA) – экзоскелет, массой всего около 12 кг, прост в установке. Небольшая батарея встроена в опору для таза, отсутствует поддержка для спины. Устройство может передвигаться по всем поверхностям, пандусам и лестнице. Шаги инициируются различными путями: при изменении положения туловища (наклон вперед, ходьба вперед), мышечная инициация пользователя (различные роботизированные ассистирующие режимы), может работать синхронизировано с функциональной электростимуляцией мышц туловища и ног. В клинических исследованиях экзоскелет недостаточно изучен. В одном из них пациенты с тетра- и параплегией обучались использованию Indego и управлению им на поверхностях разного качества. Предположительно, скорость ходьбы в экзоскелете и расстояния, пройденные пациентами, могут позволить стать им членами социума с использованием системы Indego [27]. В другом наблюдении изучались изменения показателей кардиореспираторной системы и метаболические сдвиги при ходьбе в экзоскелете пациентов с полным перерывом спинного мозга. По итогам работы получено, что изменения показателей соответствовали осуществлению нагрузки умеренной интенсивности [28]. Резюмируя результаты этих и других исследований по использованию экзоскелета Indego, можно сделать предварительные выводы о социальной направленности проекта и назначения устройства для абилитации пациентов с ПСМТ и их интеграции в общество.

Другим иностранным экзоскелетом является Ekso GT, компании Ekso Bionics (США). Представляет собой бионический роботизированный экзоскелет весом около 23 кг, разработанный для поддержки пациентов при обучении ходьбе (формирование правильного паттерна и обучение переносу веса тела). Конструкция позволяет передвигаться с использованием костылей или специальных ходунков. В основе его работы — интерфейс-аппаратно-программный комплекс, который обеспечивает динамическое изменение мощности (от 0 – 100%) отдельно для каждой стороны и позволяет настроить бионический экзоскелет индивидуально под каждого пациента. Особенности экзоскелета Ekso GT являются: запатентованная разгрузка веса – конструкция экзоскелета приспособлена для удержания собственного веса в вертикальном положении, без нагрузки на пациента; система стабилизации и поддержки голеностопного сустава; возможность продолжительного использования экзоскелета, благодаря наличию двух аккумуляторов; адаптивная роботизированная ассистенция в ходьбе. Инициация шага осуществляется 4 возможными путями: управление каждым шагом ассистентом путем нажатия кнопки на пульте управления; самостоятельное управление пациентом с пульта управления; за счет переноса веса тела латерально и вперед; за счет переноса веса тела и активации фазы переноса ноги. Несколько клинических испытаний, в том числе многоцентровых исследований, ведутся в Европе и Северной Америке по изучению влияния курса реабилитации с использованием роботизированного экзоскелета Ekso GT у пилотов с ПСМТ на различных сроках. Эти исследования включают в себя пациентов с параплегией и тетраплегией как с полным, так и неполным перерывом спинного мозга. Одно из многоцентровых исследований (PanEuro), включающее 52 участника, предварительно показало статистически значимое увеличение времени установки устройства, времени ходьбы, числа шагов, сделанных во время тренировок в Ekso GT в группах с полным и неполным перерывом спинного мозга. Курс тренировок включает 3 занятия в неделю, в течение 8 недель. Время ходьбы во время тренировок нарастало в процентном отношении в течение 8 недель, с максимальным увеличением в первые 4 недели [29]. В другом исследовании использование Ekso GT у 11 пациентов с ПСМТ и полным перерывом спинного мозга в течение 20 тренировок, 3 раза в неделю, привело к значительным улучшениям паттерна ходьбы и поддержания баланса по результатам 10-метрового теста ходьбы, 6-минутного теста ходьбы и теста «Встань и иди») [30].

Весьма важным исследованием для определения экзоскелета ассистирующим или терапевтическим устройством явилось исследование Раеда Аламро и др., включающее 6 пациентов с ПСМТ с уровнем поражения от C7 до Th4. Каждый участник осуществлял ходьбу в Ekso по недвижущейся поверхности, в Ekso на беговой дорожке, и на Lokomat на согласованных скоростях, а мышечная активность измерялась с использованием поверхностной ЭМГ. Было показано, что EksoGT отдельно и в сочетании с беговой дорожкой более эффективен, чем Локомат, в активации мышц ниже уровня травмы у пациентов с полным перерывом. Авторы объясняют эту мышечную активацию необходимостью переносить вес тела в процессе ходьбы в экзоскелете [31].

Таким образом, экзоскелет EksoGT демонстрирует положительные результаты в лечении спинальных больных и, следовательно, не может быть однозначно отнесен к ассистирующим устройствам. Учитывая его клиническую эффективность, можно рассматривать данный аппарат и как терапевтическое роботизированное устройство.

В 2011 году в НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова начались работы по созданию первого российского образца экзоскелета пассивной модификации ExoAtlet P, который позволяет человеку-оператору переносить большие грузы (70—100 кг). Модификация экзоскелета — ExoAtlet P-1 — создана для снятия нагрузки с бойцов при переноске штурмового щита. Конструкция данной версии экзоскелета снабжена устройством для фиксации и быстрого снятия щита, что крайне важно во время боевых действий. Разрабатываемый программно-аппаратный комплекс должен быть предназначен:

1. Для аварийно-спасательных работ и ликвидации последствий стихийных бедствий или техногенных катастроф, для выполнения операций пожаротушения при ограниченных запасах воздуха в дыхательных аппаратах;

2. Для решения задач, сопровождаемых переноской тяжелых грузов на большие расстояния, для разминирования и проведения антитеррористических операций.

Помимо военного применения разработчики готовят несколько моделей для использования в гражданских целях для помощи людям с ограниченными физическими возможностями. Первая созданная модификация гражданского экзоскелета ExoAtlet позволяет ходить, садиться и вставать без посторонней помощи пациентам с нарушениями двигательных функций нижних конечностей вследствие заболеваний опорно-двигательного аппарата и нервной системы, перенесенных травм и операций. Однако, несмотря на наличие регистрационного удостоверения на территории Российской Федерации, до настоящего времени не существовало опубликованных клинических результатов об эффективности и безопасности экзоскелета ExoAtlet.

Впервые исследование проведено на базе отделения медицинской реабилитации Пироговского Центра. Его целью была оценка безопасности и эффективности синхронизированного применения медицинского изделия ExoAtlet и функциональной электростимуляции в комплексной реабилитации больных с последствиями травмы спинного мозга.



Рис. 1. Ходьба пациента в Экзоскелете.

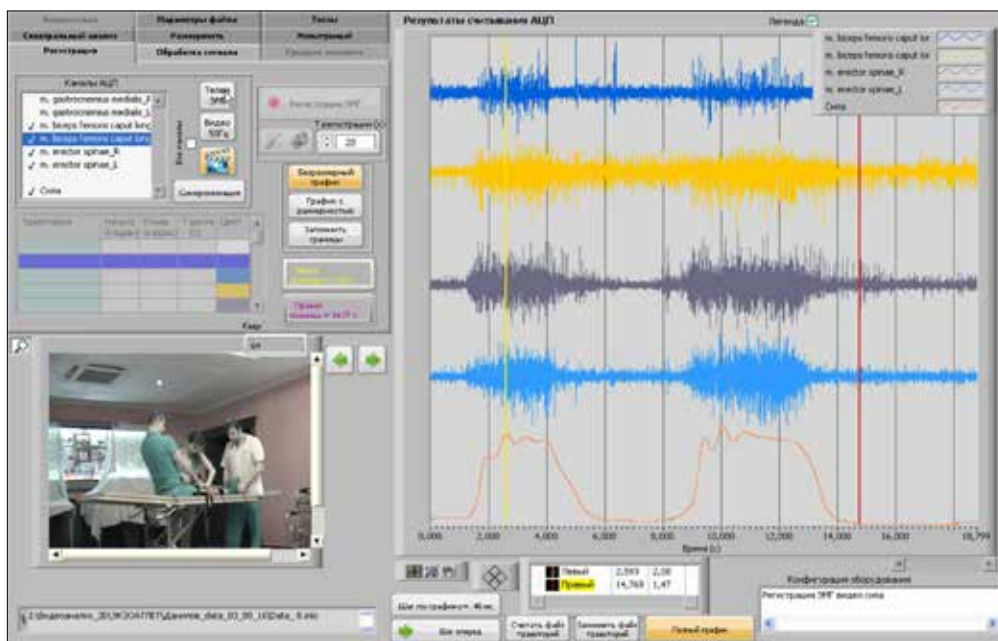


Рис. 1. Проведение силового теста. Амплитуда миограммы.

В течение 2015-2017 гг. на базе отделения медицинской реабилитации Пироговского Центра проведено обследование 64 пациентов с позвоночно-спинномозговой травмой (ПСМТ), 49 мужчин и 15 женщин, возрастом от 19 лет до 35 лет, в позднем периоде позвоночно-спинномозговой травмы на уровне грудного отдела позвоночника (средние сроки после травмы $6,5 \pm 0,5$ месяца), с синдромом неполного нарушения проводимости спинного мозга. Всем больным была проведена операция по декомпрессии спинного мозга и стабилизации позвоночника. Уровень повреждения позвоночника и спинного мозга – грудной отдел: Th6-7 – у 16,3%, Th8-9 – у 21,3%, Th10-12 – у 62,4%. При компьютерной томографии (КТ) позвоночника у всех пациентов отмечена состоятельность стабилизации и адекватное срокам формирование костной мозоли. При визуализации мягкотканого компонента методом МРТ у всех пациентов исключена компрессия спинного мозга. В клинической картине: нижний парапарез – от 0 до 3 баллов по 6-ти бальной шкале; изменения мышечного тонуса – до 3-х баллов по шкале Эшворт; возможность самостоятельно пользоваться креслом-каталкой; сохранная функция верхних конечностей. Пациенты разделены на 2 группы. В основной группе реабилитационный комплекс включал лечебную гимнастику, циклическую механотерапию и занятия на экзоскелете ExoAtlet в комбинации с функциональной электростимуляцией (ФЭС) от аппарата Аккорд Мультистим. В группе контроля помимо лечебной гимнастики и циклической механотерапии восстановление функции ходьбы проводилось на роботизированном комплексе Lokomat. Длительность занятия сопоставима с тренировками в экзоскелете ExoAtlet (от 15 до 60 минут). Продолжительность курса – 15 занятий. Во время ходьбы проводился мониторинг АД, ЧСС, сатурации крови. После каждой тренировки – исследование кожных покровов. На 1й, 5-7й, и 15й день лечения пациентам выполнялись УЗДС вен нижних конечностей, видеоанализ (линейные и угловые кинематические параметры локомоций,

динамические составляющие реакции опоры), электромиография. Сравнительная оценка энергозатрат по двум группам проводилась при помощи физиологического индекса энергозатрат (ФЭИ).

В результате проведенного исследования по данным осмотра в обеих группах у пациентов отмечалась стабилизация – существенных изменений в неврологическом статусе не выявлено. Показатели АД менялись не более чем на 15% от исходных значений, показатели ЧСС были в пределах допустимых значений. Мониторинг ЭКГ позволил исключить значимые нарушения сердечного ритма и ишемию миокарда во время ходьбы на роботизированных устройствах. Отмечено повышение толерантности к физическим нагрузкам, уменьшение энергозатрат в вертикальном направлении при ходьбе, увеличение амплитуды угловых перемещений в суставах нижних конечностей. Объективно у пациентов группы ExoAtlet отношение «средняя сила/средняя амплитуда миограммы» имело тенденцию к возрастанию, т.е. максимальная сила тяги в тесте после занятий в ExoAtlet не менялась, а амплитуда сигнала снижалась, что свидетельствовало об улучшении управления мышцами дорсальной поверхности спины после тренировки.

Кроме того, провели спектральный анализ реакции опоры, сравнивая динамические параметры ходьбы пилотов. Спектральная мощность после двухнедельных занятий в ExoAtlet снизилась. Ходьба пилотов стала более устойчивой в продольном и поперечном направлениях, о чем свидетельствовало уменьшение спектральной плотности по Fx, Fy и Fz. 2 пациента основной группы с неполным перерывом спинного мозга после реабилитационного курса могли самостоятельно ходить с двусторонней опорой.

На основании первого опыта применения экзоскелета можно сделать предварительные выводы о безопасности и клинической эффективности синхронизированного применения медицинского изделия ExoAtlet и функциональной электростимуляции в комплексной реабилитации больных с последствиями травмы спинного мозга.

Заключение

Проведенный анализ позволяет заключить, что используя экзоскелет, пациенты обретают возможность не только самостоятельно садиться и вставать, ходить, подниматься и спускаться по лестницам, но и проводить столь значимую профилактику вторичных осложнений гиподинамии, уменьшать интенсивность боли, снижать спастичность, укреплять мышцы туловища и конечностей, увеличивать толерантность к физиче-

ской нагрузке, а в некоторых случаях, самостоятельно ходить. Несмотря на то, что на сегодняшний день экзоскелеты не являются общепринятыми средствами в лечении пациентов с ПСМТ, в перспективе они будут играть важную роль в реабилитации этой тяжелой категории больных и смогут стать эффективным дополнением в линейке традиционных методов комплексного лечения пациентов с поражением центральной нервной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпов О.Э. Автоматизация процессов, цифровые и информационные технологии в управлении и клинической практике лечебного учреждения: научные труды; Деловой экспресс, 2016. — 388 с.
2. Карпов О.Э., Ветшев П.С., Махнев Д.А., Епифанов С.А., Даминов В.Д., Зуев А.А., Кузьмин П.Д. Цифровые технологии в хирургической практике и реабилитации; автоматизация процессов, цифровые и информационные технологии в управлении и клинической практике лечебного учреждения: научные труды / под ред. О.Э. Карпова. — М.: Деловой экспресс, 2016: 238-254.
3. Карпов О.Э., Ветшев П.С. Роботассистированная хирургия — воплощение инновационных технологий в клиническую практику; автоматизация процессов, цифровые и информационные технологии в управлении и клинической практике лечебного учреждения: научные труды; под ред. О.Э. Карпова. — М.: Деловой экспресс, 2016: 254-262.
4. Экзоскелет — военное и мирное применение; Главный механик; 2011; № 11; 50—54.
5. Щербakov В. Технологии: железные солдаты; Журнал для спецназа; 2011; № 1
6. Binkiewicz-Glinska A., Sobierajska-Rek A., Bakula S., Wierzbza J., Drewek K., Kowalski I. M., Zaborowska-Sapeta K. Arthrogyposis in infancy, multidisciplinary approach: casereport // Proc Natl Acad Sci U S A. 2013, Mar 19;110(12).
7. Raytheon XOS 2 Exoskeleton, Second-Generation Robotics Suit, United States of America; 2014
8. Бедняк С. Г., Еремина О. С. Роботизированные экзоскелеты HAL (почувствуй себя HAL'ком); Сборник научных трудов Sworld, 2014; № 1; 49—51.
9. «HULC». Lockheed Martin / Retrieved, 2011-08-02.
10. Леонтьев М.А., Овчинников О.Д. Изучение показаний к восстановлению локомоторных функций у пациентов с ТБСМ и препятствующих локомоции факторов; Вестник Кузбасского научного Центра СО РАМН; 2005; № 1; 131-136.
11. Дашко И.А. Автореферат кандидатской диссертации «Дифференцированный подход к комплексной терапии и реабилитации больных в зависимости от степени и уровня травматического повреждения спинного мозга»; Москва; 2010 г.; 46 с.
12. Зимица Е.В. Автореферат кандидатской диссертации «Медицинская реабилитация больных с применением роботизированной реконструкции ходьбы в первые месяцы после травмы спинного мозга»; Москва; 2010 г.; 23 с.
13. Dobkin V. H. International Randomized Clinical Trial, Stroke Inpatient Rehabilitation With Reinforcement of Walking Speed (SIRROWS), Improves Outcomes/Neurorehabilitation and Neural Repair; 2010; Vol. 24; No 3; 235-242.
14. Карпов О.Э., Замятин М.Н., Даминов В.Д., Герцик Ю.Г., Герцик Г.Я. Повышение эффективности эксплуатации роботизированных систем для медицинской реабилитации путем внедрения информационно-телекоммуникационных технологий// Менеджер здравоохранения. 2016. № 6. С. 36-44.
15. Даминов В.Д. Автореферат докторской диссертации «Совершенствование системы технологий роботизированной механотерапии в реабилитации больных с поражением центральной нервной системы»; Москва; 2013 г.
16. Даминов В.Д., Горохова И.Г., Ткаченко П.В. Антигравитационные технологии восстановления ходьбы в клинической реабилитации; Вестник восстановительной медицины; 2015; №4; 33-36
17. Клочков А.С. Автореферат кандидатской диссертации «Роботизированные системы в восстановлении навыка ходьбы у пациентов, перенесших инсульт»; Москва; 2012 г.; 26 с.
18. Ткаченко П. В., Даминов В. Д. «Необходимость реабилитации пациентов с рассеянным склерозом после трансплантации стволовых клеточных линий»; ВВМ; 2015; №4; 9-12
19. Черникова Л.А., Курортные ведомости №5; 2015; 92
20. Mehrholz J, Elsner B, Werner C, Kugler J, Pohl M. Electromechanical-assisted training for walking after stroke; Cochrane Database Syst Rev; 2013 Jul 25;7:CD006185).
21. Rewalk' bionic legs get FDA approval; News.com.au.; 2011. Retrieved 13 May 2012; 22.
22. Asselin P1, Knezevic S, Kornfeld S, Cirnigliaro C, Agranova-Breyter I, Bauman WA, Spungen AM //Heart rate and oxygen demand of powered exoskeleton-assisted walking in persons with paraplegia; J Rehabil Res Dev. 2015;52(2):147-58.
23. Raab K1, Krakow K2, Tripp F1, Jung M3 Effects of training with the ReWalk exoskeleton on quality of life in incomplete spinal cord injury: a single case study; Spinal Cord Ser Cases. 2016 Jan 7;2:15025.
24. Kasai R1, Takeda S2., The effect of a hybrid assistive limb(®) on sit-to-stand and standing patterns of stroke patients; J Phys Ther Sci. 2016 Jun;28(6):1786-90.
25. Cruciger O, Schildhauer TA, Meindl RC, Tegenthoff M, Schwenkreis P, Citak M, Aach MDisabil Rehabil Assist Technol. / Impact of locomotion training with a neurologic controlled hybrid assistive limb (HAL) exoskeleton on neuropathic pain and health related quality of life (HRQoL) in chronic SCI: a case study // 2016 Aug;11(6):529-34.
26. Tsukahara A, Hasegawa Y, Eguchi K, Sankai Y Restoration of gait for spinal cord injury patients using HAL with intention estimator for preferable swing speed; IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng. 2015 Mar;23(2):308-18.
27. Hartigan C, Kandilakis C, Dalley S, Clausen M, Wilson E, Morrison S, Etheridge S, Farris R.; Mobility Outcomes Following Five Training Sessions with a Powered Exoskeleton; 2015; Spring; 21(2):93-9.
28. Evans N., C. Hartigan, C. Kandilakis, E. Pharo, and I. Clesson Acute Cardiorespiratory and Metabolic Responses During Exoskeleton-Assisted Walking Overground Among Persons with Chronic Spinal Cord Injury Topics in Spinal Cord Injury Rehabilitation; American Spinal Injury Association; 2015; Vol:21 No.2
29. Nissen UV, Baunsgaard CB, Frotzler A, Brust AK, Ribeill C, Kalke Y-B, León N, G, Samuelsson K, Antepohl W, Holmström U, Marklund N, Glott T, Opheim A, Benito J, Murillo N, Nachtegaal J, Faber W, Gobets D, BieringSørensen F. Gait training in the Ekso™ robotic-exoskeleton after spinal cord injury; Poster presentation; ISCoS Meeting; September 15, 2016.
30. Stampacchia G, Rustici A, Bigazzi S, D'Avino C, Gerini A, Battini E, Franchini A, Tombini T, Mazzoleni S. Effects of exoskeleton gait training in SCI persons: pain, spasticity and endurance. Poster presentation. ISCoS Meeting; September 15, 2016.
31. Raed Alamro, Amanda Chisholm, Tania Lam Trunk Muscle Activation Patterns During Walking With Robotic Exoskeletons in People with High Thoracic Motor Complete SCI; University of British Columbia, Vancouver, Canada; ASNR Meeting; 2016

REFERENCES

1. Karpov O.E. Automation of processes, digital and information technologies in the management and clinical practice of a medical institution: scientific works; Business Express, 2016. – 388 p.
2. Karpov O.E., Vetshev P.S., Makhnev D.A., Epifanov S.A., Daminov V.D., Zuev A.A., Kuzmin PD DIGITAL TECHNOLOGIES IN SURGICAL PRACTICE AND REHABILITATION ; Automation of processes, digital and information technologies in the management and clinical practice of a medical institution: scientific works / Ed. O.E. Karpov. – M .: Business express, 2016: 238-254.

3. Karpov O.E., Vetshev P.S. Robot-SURGERY – MAKING INNOVATION TECHNOLOGIES in clinical practice; Automation of processes, digital and information technologies in the management and clinical practice of a medical institution: scientific works; Ed. O.E. Karpov. – M.: Business express, 2016: 254-262.
4. Exoskeleton – military and peaceful use; Glavnyj mekhanik; 2011; № 11; 50–54.
5. Shherbakov V. [Technology: iron soldiers] Bratishka; Zhurnal dlja specnaza; 2011; № 1
6. Binkiewicz-Glinska A., Sobierajska-Rek A., Bakula S., Wierzba J., Drewek K., Kowalski I. M., Zaborowska-Sapeta K. Arthrogyposis in infancy, multidisciplinary approach: casereport // Proc Natl Acad Sci U S A. 2013, Mar 19; 110(12).
7. Raytheon XOS 2 Exoskeleton, Second-Generation Robotics Suit, United States of America; 2014
8. Bednjak S. G., Eremina O. S. [Robotic exoskeletons HAL (Feels HALC)] Sbornik nauchnyh trudov Sworld; 2014; № 1; 49–51.
9. «HULC». Lockheed Martin; Retrieved; 2011-08-02.
10. Leont'ev M.A., Ovchinnikov O.D. [The study of the indications for recovery of locomotor function in patients with SCI and factors impeding locomotion]; Vestnik Kuzbasskogo nauchnogo Centra SO RAMN; 2005; № 1; 131-136.
11. Dashko I.A. Avtoreferat kandidatskoj dissertacii [Differentiated integrated approach to the therapy and rehabilitation of patients depending on the extent and level of traumatic spinal cord injury]; Moskva; 2010 g.
12. Zimina E.V. Avtoreferat kandidatskoj dissertacii [Medical rehabilitation of patients with the use of robotic reconstruction walk in the first months after spinal cord injury]; Moskva; 2010 g.
13. Dobkin V. N. International Randomized Clinical Trial, Stroke Inpatient Rehabilitation With Reinforcement of Walking Speed (SIRROWS), Improves Outcomes // Neurorehabilitation and Neural Repair; 2010; Vol. 24; No 3; 235-242.
14. Karpov OE, Zamyatin MN, Daminov VD, Gercik Yu.G., Gercik G.Ya. Increasing efficiency of robotic systems operation for medical rehabilitation by introduction of information-telecommunication technologies // Manager of public health services. 2016. № 6. P. 36-44.
15. Daminov V.D. Avtoreferat doktorskoj dissertacii [Improving technology robotic system mechanotherapy in the rehabilitation of patients with central nervous system]; Moskva; 2013 g.
16. Daminov V.D., Gorohova I.G., Tkachenko P.V. [Antigravity Technology recovery walk in clinical rehabilitation]; VVM; 2015; №4; 33-36
17. Klochkov A.S. Avtoreferat kandidatskoj dissertacii [Robotic systems in restoring skill walk in stroke patients]; Moskva; 2012 g.
18. Tkachenko P. V., Daminov V. D. [Necessity rehabilitation of patients with multiple sclerosis after stem cell transplantation]; VVM; 2015; №4; 9-12
19. Chernikova L.A., Kurortnye vedomosti №5; 2015; 92
20. Mehrholz J, Elsner B, Werner C, Kugler J, Pohl M. Electromechanical-assisted training for walking after stroke; Cochrane Database Syst Rev; 2013 Jul 25;7:CD006185).
21. Rewalk' bionic legs get FDA approval; News.com.au.; 2011. Retrieved 13 May 2012;
22. Asselin P1, Knezevic S, Kornfeld S, Cirnigliaro C, Agranova-Breyter I, Bauman WA, Spungen AM //Heart rate and oxygen demand of powered exoskeleton-assisted walking in persons with paraplegia; J Rehabil Res Dev. 2015;52(2):147-58.
23. Raab K1, Krakow K2, Tripp F1, Jung M3 Effects of training with the ReWalk exoskeleton on quality of life in incomplete spinal cord injury: a single case study; Spinal Cord Ser Cases. 2016 Jan 7;2:15025.
24. Kasai R1, Takeda S2., The effect of a hybrid assistive limb(®) on sit-to-stand and standing patterns of stroke patients; J Phys Ther Sci. 2016 Jun;28(6):1786-90.
25. Cruciger O1, Schildhauer TA2, Meindl RC1, Tegenthoff M3, Schwenkreis P3, Citak M2, Aach M1 Disabil Rehabil Assist Technol. //Impact of locomotion training with a neurologic controlled hybrid assistive limb (HAL) exoskeleton on neuropathic pain and health related quality of life (HRQoL) in chronic SCI: a case study // 2016 Aug;11(6):529-34.
26. Tsukahara A, Hasegawa Y, Eguchi K, Sankai Y //Restoration of gait for spinal cord injury patients using HAL with intention estimator for preferable swing speed. // IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng. 2015 Mar;23(2):308-18.
27. Hartigan C1, Kandilakis C1, Dalley S2, Clausen M2, Wilson E2, Morrison S2, Etheridge S2, Farris R2. Top Spinal Cord Inj Rehabil. //Mobility Outcomes Following Five Training Sessions with a Powered Exoskeleton; 2015; Spring; 21(2):93-9.
28. Evans N., C. Hartigan, C. Kandilakis, E. Pharo, and I. Clesson Acute Cardiorespiratory and Metabolic Responses During Exoskeleton-Assisted Walking Overground Among Persons with Chronic Spinal Cord Injury Topics in Spinal Cord Injury Rehabilitation; American Spinal Injury Association; 2015; Vol:21 No. 2
29. Nissen UV, Baunsgaard CB, Frotzler A, Brust AK, Ribeill C, Kalke Y-B, León N, G, Samuelsson K, Antepohl W, Holmström U, Marklund N, Glott T, Opheim A, Benito J, Murillo N, Nachtegaal J, Faber W, Gobets D, BieringSørensen F. Gait training in the Ekso™ robotic-exoskeleton after spinal cord injury; Poster presentation; ISCoS Meeting; September 15, 2016.
30. Stampacchia G, Rustici A, Bigazzi S, D'Avino C, Gerini A, Battini E, Franchini A, Tombini T, Mazzoleni S. Effects of exoskeleton gait training in SCI persons: pain, spasticity and endurance. Poster presentation. ISCoS Meeting; September 15, 2016.
31. Raed Alamro, Amanda Chisholm, Tania Lam Trunk Muscle Activation Patterns During Walking With Robotic Exoskeletons in People with High Thoracic Motor Complete SCI; University of British Columbia, Vancouver, Canada; ASNR Meeting; 2016

РЕЗЮМЕ

В статье приводится анализ мирового опыта применения экзоскелетов и собственные результаты применения технологии в ФГБУ «НМХЦ им Н.И. Пирогова Минздрава РФ» (далее – Пироговский Центр) в течение 2015-2017 годов. Приоритетными областями использования экзоскелетов являются военная промышленность и медицина. Отмечено, что данные, приведенные в анализируемых работах, различаются между собой по длительности курса, числу и типу тренировок, характеристикам и количеству больных. Несмотря на это, в большинстве исследований была подтверждена положительная роль использования экзоскелетов в улучшении двигательного контроля – мышечной активации и координации движений. Среди позитивных результатов использования экзоскелета отмечают: уменьшение вторичных осложнений гиподинамии, боли, снижение спастичности, увеличение плотности костной ткани, укрепление мышц туловища и конечностей, повышение толерантности к физической нагрузке, а иногда и самостоятельная независимая ходьба. Преимуществом тренировки в экзоскелете явилась ходьба по недвижущейся поверхности с осуществлением физиологической схемы (pattern), а также значительное облегчение работы кинезотерапевтов с тяжелыми больными. Обобщен опыт применения экзоскелетов в медицинской реабилитации и в Пироговском Центре, который в целом совпадает с данными ведущих реабилитационных центров. Целью исследования была оценка безопасности и эффективности синхронизированного применения экзоскелета ExoAtlet и ФЭС в комплексной реабилитации больных с последствиями травмы спинного мозга. По его результатам, у пациентов существенные изменения в неврологическом статусе отсутствовали. Показатели АД менялись не более чем на 15%, ЧСС были в пределах допустимых значений. Мониторинг ЭКГ позволил исключить нарушения сердечного ритма и ишемию миокарда во время ходьбы на роботизированных устройствах. Отмечено повышение толерантности к физическим нагрузкам, уменьшение энергозатрат в вертикальном направлении при ходьбе, увеличение амплитуды угловых перемещений в суставах нижних конечностей. Объективно у пациентов группы ExoAtlet отмечалось улучшение управления мышцами дорсальной поверхности спины и их максимальной электрической активности, ходьба стала более устойчивой в продольном и поперечном направлениях. Проведенный анализ позволяет сделать вывод о целесообразности применения экзоскелета в реабилитации пациентов с позвоночно-спинномозговой травмой.

Ключевые слова: экзоскелет, ходьба, физиологическая схема, паттерн, реабилитация, позвоночно-спинномозговая травма, парез, нижние конечности, спастичность, мышечная активация, энергозатраты.

ABSTRACT

Analyzing the worldwide experience of the exoskeleton's application and own results in the Pirogov Center during the period from 2015 till 2017 years, it was noted that the priority areas for the exoskeleton's application are military industry and medicine. It should be noted that analyzed papers of the exoskeleton's application in medical rehabilitation of patients with spinal cord injury were differed in the length of the course, the number and type of training, characteristics and number of patients. Despite of this, most of the studies has been confirmed positive role in improving of motor control using of the exoskeletons – improving muscle activation pattern and movement coordination. Important positive results of the exoskeleton's application are: reduction of secondary complications of immobility, decreasing spasticity and pain, increasing of bone density, strengthening of the trunk and extremities muscles, increasing exercise tolerance, and in some cases, self independent walking. The advantage of the exoskeleton training was walking on the unmoving surface using the physiological pattern and significant decreased work of the physiotherapists with heavy patients. The experience of the exoskeleton's application has been analyzed in the Pirogov Center too, and it coincides with the data of the leading rehabilitation centers on the whole. The aim of our research was evaluation of the safety and effectiveness of the synchronized application of the exoskeleton ExoAtlet® with FES in the complex rehabilitation of the SCI patients. Significant changes in the neurological status were not revealed after rehabilitation course. BP values were changed by not more than 15% from baseline, HR values were within acceptable values. ECG monitoring excluded significant cardiac pathology during walking. We had increasing tolerance to physical stress and reducing energy consumption in vertical direction during walking, increasing in the amplitude of the angular movements of the leg's joints. It was objectively noted improvements in back muscles control and muscle's maximum electrical activity, walking became more stable about the transverse and sagittal axis. This review leads to the conclusion on the possibility of the exoskeleton's application in rehabilitation of the patients with spinal cord injury.

Keywords: exoskeleton, walking, physiological scheme, pattern, rehabilitation, spinal cord injury, paresis, legs, spasticity, muscle activation, energy consumption.

Контакты:

Даминов В.Д. E-mail: daminov07@mail.ru