

ПЕДАГОГИКА

УДК 615.47:621.865.8:616-009.2

Е.А. Баранова, Ю.П. Бредихина, А.В. Кабачкова,
Ю.Г. Калинникова, В.К. Пашков

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РОБОТИЗИРОВАННОЙ МЕХАНОТЕРАПИИ С ЭЛЕМЕНТАМИ БИОУПРАВЛЕНИЯ И ТЕЛЕМЕДИЦИНЫ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ УТРАЧЕННЫХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ

Работа выполнена за счет проекта ВИУ ИСГТ ТПУ 108/2017 «Люди и технологии».

В настоящее время двигательная адаптация и восстановление утраченных двигательных функций в более короткие сроки является важной экономической задачей. Реабилитация пациентов с нарушением двигательных функций – это трудоемкий, длительный и многоэтапный процесс, требующий колоссальных сил инструктора, самого пациента и его окружения. Поэтому применение автоматизированной техники позволяет повысить интенсивность проводимой терапии и качество тренировок по сравнению с классической лечебной гимнастикой без привлечения дополнительных средств. Сегодня в разных странах мира производится широкий спектр реабилитационных аппаратов – от простейших приспособлений, некоторые из которых можно сделать самому, до сложнейших диагностических и роботизированных комплексов, использующих последние достижения науки и техники

Ключевые слова: двигательная адаптация; роботизированная механотерапия; биоуправление; роботизированный тренажер; пассивная вертикализация; вертикалайзатор.

Реабилитация пациентов – это трудоемкий, длительный и многоэтапный процесс, включающий в себя множество составляющих (эрготерапию, кинезиотерапию, курсы массажа, лечебную физическую культуру, занятия с психологом, логопедом, лечение у невропатолога и пр.) и требующий колоссальных сил инструктора, самого пациента и его окружения [1]. Отчасти поэтому реабилитация – весьма дорогостоящая услуга и для многих труднодоступная.

Безусловно, восстановление утраченных функций в более сжатые сроки является экономически оправданным, что обуславливает появление новых методов, подходов и технологий в области медицинской реабилитологии [2], основанных на результатах научных исследований. В настоящее время в реабилитационных целях все шире используются аппаратные воздействия с проведением роботизированной механотерапии [3]. Такие приборы механически изменяют подвижность суставов и состояние мышц конечностей и туловища, действуя по определенной программе, при этом используется биологическая обратная связь, и зачастую применяется игровая или виртуальная среда [2].

Преимуществом робототерапии является более высокое качество тренировок по сравнению с классической лечебной гимнастикой за счёт большей их длительности, точности повторяющихся циклических движений, постоянной программы тренировок, наличия инструментов оценки успешности проводимых занятий с возможностью демонстрации пациенту. Кроме того, применение автоматизированной техники позволяет повысить интенсивность проводимой терапии без привлечения дополнительного персонала [4, 5]. Таким образом, это экономически оправдывает затраты на приобретение приборов роботизированной механотерапии, хотя зачастую такие специализированные тренажеры являются импортным и дорогим оборудованием.

Цель исследования: проанализировать и обобщить современные подходы к роботизированной механотерапии с элементами биоуправления и телемедицины, направленные на восстановление утраченных двигательных функций.

Сегодня в разных странах мира производится широкий спектр реабилитационных аппаратов – от простейших приспособлений, некоторые из которых можно сделать самому, до сложнейших диагностических и роботизированных комплексов, использующих последние достижения науки и техники [30]. Среди зарубежных компаний, занимающихся разработкой и выпуском комплексов для роботизированной механотерапии, стоит выделить такие, как *Biodex Medical Systems*, *Cybex* и *Ekso Bionics* (все – США), *Nosota* (Швейцария), *Motorika* и *ReWalk Robotics* (Израиль), *Cyberdyne HAL* (Япония). При этом компании *Ekso Bionics* (США), *ReWalk Robotics* (Израиль) и *Cyberdyne HAL* (Япония) занимаются производством роботизированных экзоскелетов. На отечественном рынке можно выделить компанию ЭкзоАтлет (Россия), которая занимается разработкой и производством медицинского экзоскелета (был представлен на выставке российских робототехнических изделий «Роботы в России на RoboTrends.ru» в 2017 г.). А также НВП Орбита (Россия), выпускающая серию роботизированных тренажеров ОРМЕД.

Сравнительная характеристика аппаратов для роботизированной механотерапии

Среди существующих аппаратов роботизированной механотерапии, которые используются в мировой практике для посттравматической реабилитации, стоит выделить Artromot (Германия); Kinetec (Франция); Fisiotek (Италия); ОРМЕД-Flex (Россия); LegTutor (Израиль); Biodex Medical Systems (США), CONTREX (Германия) и Lokomat (Швейцария). Стоимость

указанных приборов варьирует от 10 млн до 399 млн долларов США и выше, в зависимости от опционального содержания.

Линия аппаратов *Artromot* (производитель ORMED, Германия) – это специализированные CPM-тренажеры (*continuous passive motion, CPM*), предназначенные для продолжительной пассивной разработки того или иного сустава, например, для восстановления коленного сустава предназначен *Artromot K1*. Существуют разновидности модели, предназначенные для разработки лодыжки и голеностопного сустава (*Artromot SP3*), а также для специфического воздействия на тазобедренный сустав (*Artromot K3* и *Artromot K4*) [6]. Рассмотрим подробнее тренажер *Artromot K1*. Прибор является универсальным для правой и левой конечности. Доступны модели класса *standard* и *comfort*. Среди преимуществ этого тренажера отмечают его компактность, простоту в использовании (управление с использованием ручного пульта и интуитивно понятной навигацией) и возможность лечения детей в возрасте от 6 лет [7]. Так как периартикулярные ткани разрабатываются циклически, отмечается полнейшая релаксация мышц, что позволяет избавлять пациента от болезненных ощущений (в том числе предусмотрен разогревающий режим работы) [8]. При составлении программы реабилитации с использованием данного тренажера индивидуально подбирается скорость, амплитуда, частота и степень нагрузки (сохранение показателей лечения и регулируемых показателей для каждого пациента доступно при использовании запоминающей чип-карты). Так, для коленного сустава возможно пассивное сгибание-разгибание в пределах -10° – 0° – 125° , для тазобедренного – 0° – 15° – 100° [7, 9]. Стоит отметить, что модель *Artromot SP3* позволяет проводить дорсальное / плантарное сгибание в пределах -40° – 0° – 60° и инверсию / эверсию стопы – -40° – 0° – 20° [10]. Многочисленными исследованиями доказана высокая эффективность использования *Artromot K1* для посттравматической реабилитации пациентов, а также профилактики контрактур различного генеза [11–13].

Специализированное оборудование для реабилитации опорно-двигательного аппарата компании *Kinetec* (Франция) аналогично *Artromot* предназначено для CPM-терапии тазобедренного и коленного суставов. Прибор является универсальным для правой и левой конечности с возможностью вовлечения в работу голеностопного, коленного и тазобедренного суставов. Различные модели *Kinetec™ Spectra™* обладают такими преимуществами, как компактность и простота в использовании (управление с использованием ручного пульта и интуитивно понятной навигацией). При составлении программы реабилитации с использованием данного тренажера индивидуально подбирается скорость, амплитуда, частота и степень нагрузки (сохранение показателей лечения, регулируемых показателей для каждого пациента и всего прогресса терапии доступно при использовании версии *Spectra DC (Data Capture)*), в том числе есть возможность настройки пределов болевых ощущений, которые обеспечиваются встроенными датчиками боли. *Data Capture* – это уникальное программное обеспечение

Kinetec для управления и обработки данных терапии [14]. Тренажер может быть использован для пациентов ростом от 112 см до 206 см. Для коленного сустава возможно пассивное сгибание-разгибание в пределах -3° – 130° , для тазобедренного – 8° – 80° , при этом в голеностопном суставе допустимо плантарное / дорсальное сгибание в пределах -40° – 30° и инверсия / эверсия стопы – -30° – 30° [15]. Преимущественным решением *Kinetec Performa knee CPM* является возможность подключения миостимулятора [16].

Линия аппаратов *Fisiotek* от компании *Rime* (Италия) также предназначена для пассивной разработки суставов конечностей. Прибор является универсальным для правой и левой конечности с возможностью вовлечения в работу голеностопного, коленного и тазобедренного суставов (зависит от модели). Тренажер обладает такими преимуществами, как компактность и простота в использовании (управление с использованием ручного пульта и интуитивно понятной навигацией). Наряду с этим для *Fisiotek 2000* есть дополнительные принадлежности, позволяющие проводить реабилитацию пациентов с длиной нижних конечностей менее 73 см. При составлении программы реабилитации с использованием данного тренажера индивидуально подбирается скорость, амплитуда, частота и степень нагрузки (сохранение регулируемых показателей для каждого пациента доступно при использовании карт памяти в моделях *2000GS* и *2000TS*). Для коленного сустава возможно пассивное сгибание-разгибание в пределах -5° (0°)– 110° , для тазобедренного – 10° – 70° , для голеностопного – 20° – 40° (диапазон амплитуды зависит от модели, а использование дополнительных принадлежностей позволяет увеличить амплитуду движения в тазобедренном суставе до 135°) [17].

Среди отечественных аналогичных разработок стоит выделить тренажер для пассивного воздействия на колено и бедро марки *ОРМЕД-Flex* от научно-внедренческого предприятия «Орбита» (Россия). Прибор также является универсальным для правой и левой конечности с возможностью вовлечения в работу коленного и тазобедренного суставов. Среди преимуществ этого тренажера отмечают его компактность, простоту в использовании (управление с использованием ручного пульта и интуитивно понятной навигацией) и более низкую стоимость по сравнению с зарубежными аналогами (примерно в 4 раза дешевле). Тренажер позволяет индивидуально подбирать скорость, амплитуду, частоту и степень нагрузки (предусмотрено несколько уровней и режимов работы). Для коленного сустава допустимо пассивное сгибание-разгибание в пределах -10° – 120° , для тазобедренного – 7° – 115° [18]. Согласно руководству по эксплуатации (2016) тренажер относится к профессиональному, коммерческому классам применения и предназначен для использования в спортивных и оздоровительных клубах, косметологических кабинетах, учебных заведениях, гостиницах и клубах [19]. При этом в литературе встречаются положительные результаты клинических исследований и, как следствие, рекомендации к использованию в медицинской практике [20].

Аппараты линии *LegTutor* от производителя Meditouch (Израиль) в отличие от тренажеров *Ar-tromot*, *Kinetec*, *Fisiotek* и *ОРМЕД-Flex* представляют собой ортез со встроенными оптическими датчиками и реабилитационное программное обеспечение. Технология восстановления функциональных двигательных навыков происходит за счет активных (произведенных самим пациентом) повторяющихся упражнений в сочетании с расширенной обратной связью, отображающей состояние контролируемой функции на экране при помощи компьютерных игр. Аппарат линии *LegTutor* имеет амплитудные ограничители, которые сужают динамический диапазон разгибания и сгибания в коленном суставе, благодаря чему есть возможность дозировки физической нагрузки за счет настройки угла движения, скорости и чувствительности под конкретного пациента. Допустимо сгибание-разгибание в коленном и тазобедренном суставе, а также отведение-приведение и вращение в тазобедренном суставе. Благодаря настройке динамического диапазона и наличию многочисленных параметров настроек упражнения уровень сложности игры настраивается под функциональные возможности пациента, тем самым мотивируя пациента к многократному повторению упражнений и в конечном счете получению максимального эффекта от лечения [21].

Мультисуставный комплекс «System 4» от компании *Biodex Medical Systems* (США) представляет собой роботизированный мультисуставный комплекс, укомплектованный тележкой для размещения приспособлений и набором приспособлений для работы с тазобедренным, коленным, плечевым, локтевым суставами, с голеностопом и запястьем (общая занимаемая площадь $6,5 \text{ м}^2$) [22]. Комплекс позволяет проводить мобилизацию суставов в направлениях сгибание-разгибание, отведение-приведение и ротация, что необходимо для полноценного восстановления утраченной двигательной функции как у взрослых, так у детей. *Biodex Medical Systems* позволяет реализовывать пассивный (с изменением скорости в широком диапазоне как для преодоления естественного рефлекса растяжения, так и в дальнейшем активной помощи в движении), изометрический (для развития статической силы мышц, если движение вызывает боль), изокинетический (универсальный режим тестирования, с возможностью изменения скорости в широком диапазоне) и изотонический режимы (возможность работы в формате концентрик / концентрик, эксцентрик / концентрик и концентрик / эксцентрик), режим контролируемого увеличения диапазона движения с обратной связью, реактивный эксцентрический режим. При этом комплекс оценивает такие показатели, как диапазон движения в суставе, максимальная сила мышц, угол и время максимальной силы, ускорение-торможение, суммарная работа (выносливость), коэффициент агонист / антагонист, коэффициент стабильности работы сустава и пр. Система предлагается в двух модификациях *System 4 PRO* и *System 4 Quick Set* [23].

CON-TREX (Physiomed, Германия) представляет собой роботизированный биомеханический диагностический тренажерный комплекс с биологической

обратной связью, рекомендованный к использованию для детей старше 11 лет. В комплексе реализованы уникальные технологии, такие как «тренировка в условиях невесомости» (активная компенсация силы тяжести) и баллистический режим (тренировка с естественными скоростями по всей амплитуде движения даже для очень слабых пациентов). Комплекс разделен на несколько модулей и позволяет проводить диагностику и тренировку для всех основных суставов верхних и нижних конечностей в изолированных и смешанных движениях; комплексные движения нижних конечностей в унилатеральном, билатеральном или поочередном режимах; разгибание и сгибание туловища стоя; мелкие моторные и комплексные повседневные движения. *CON-TREX* включает возможность работы в таких режимах, как изокинетический (классический и баллистический), изотонический (классический и баллистический), изометрический, СРМ, комбинированный (концентрическое / срм, срм / концентрическое, эксцентрическое / срм, срм / эксцентрическое) и свободный (свободно определяемые шаблоны движения (например, ходьба)) [24].

Lokomat (Hocoma, Швейцария) представляет собой роботизированный ортез, выполняющий физиологические движения нижних конечностей у пациентов с нарушениями функции ходьбы (общая занимаемая площадь $12,6 \text{ м}^2$ при весе комплекса около 850 кг) [25]. *Lokomat* комбинирует функциональную локомоторную терапию с мотивацией и оценкой состояния пациента посредством расширенных инструментов обратной связи и виртуальной реальности, что устанавливает новые стандарты в роботизированной реабилитации. Например, модуль FreeD позволяет выполнять боковые движения и поперечные вращения таза, а пациенты могут полностью перенести вес на ногу и тем самым активировать постуральные мышцы и улучшить баланс [26].

Сравнительная характеристика вертикализаторов

Еще одна важная группа средств технической реабилитации – вертикализаторы, применяемые для пассивной вертикализации пациента. Выделяют различные типы вертикализаторов:

1) по опоре:

– переднеопорные (пациент опирается на живот; наиболее популярный и часто использующийся в настоящий момент);

– заднеопорные (пациент фиксируется на опоре под спину и постепенно поднимается из положения лежа; как правило, используется для пациентов с серьезными нарушениями функций опорно-двигательного аппарата, а также не способным самостоятельно держать голову);

– универсальные или многоуровневые (при различной настройке можно переводить из одного положения в другое, пациент может сидеть, стоять, лежать и занимать положение полустоя);

2) по возможности перемещения:

– статичные (пациент не может самостоятельно передвигаться, находясь в устройстве);

– мобильные (пациент может передвигаться, находясь в устройстве в положении стоя, при этом есть

возможность тренировать мышцы ног при совершении движений руками) [31].

Среди существующих аппаратов вертикализации, которые используются для посттравматической реабилитации, стоит выделить аппараты фирм: *Rifton* (США), *Altimate Medical* (США), *Nosota* (Швейцария), *AKCESMED ПАРАМОБИЛЬ* (Польша), *PHYSIOMED Elektromedizin AG* (Германия), *SHIFU OCEAN Fumagalli* (Италия), Геркулес (Россия), *Taneta* (Литва) и пр. Стоимость указанных приборов варьирует от 2 млн 280 тыс. до 20 млн долларов США и выше, в зависимости от опционального содержания.

Rifton (США) является первой фирмой, разработавшей мобильный вертикализатор. Стоимость устройств колеблется от 11 млн до 43 млн долларов США. Например, ТранСтендер (*Rifton*) разработан для людей с нарушенной координацией движений головы и плечевого пояса, опорно-двигательного аппарата и повреждениями спинного мозга. Он подходит для пациентов любого возраста, так как имеет четыре размера. В отличие от ортопостатического стола, данное устройство позволяет вертикализировать пациентов даже с выраженным контрактурами и деформациями, не опорными стопами, при вывихах бедер (благодаря большому количеству регулируемых во всех плоскостях поддержек и комфортным широким ремням-фиксаторам) [32, 33].

Модульная конструкция *EasyStand EVOLV GLIDER ADULT Altimate Medical* (США) делает его универсальной стоячей рамкой, которая оснащена оригинальной системой ремней-фиксаторов и приводом для вертикального положения пациента прямо из коляски. Применение вертикализатора рассчитано на довольно активных пациентов, вес которых не превышает 159 кг, а рост – 152–195 см [34, 35].

Erigo (*Nosota*, Швейцария) – это стол-вертикализатор с интегрированным роботизированным ортопедическим устройством и синхронизированной функциональной электростимуляцией, позволяющим одновременно проводить три вида терапии:

- вертикализацию пациента (от 0 до 90°);
- интенсивную циклическую двигательную терапию в виде пассивных динамических движений нижних конечностей (от 0 до 80 шагов в минуту);
- стимуляцию опорной нагрузки.

Максимальный вес пациента – 135 кг, регулируемый диапазон движения 0–45° (симметричный / асимметричный), а регулируемый угол растяжения тазобедренного сустава 0°–10°. *Erigo* доступен как в стандартной (*ErigoBasic*) [36], так и в расширенной версии (*ErigoPro*) [37]. С помощью *ErigoPro* стимуляция пациента может быть дополнительно усиlena синхронной функциональной электрической стимуляцией [37].

Аппараты *AKCESMED* (Польша) позволяют родителям садить и ставить детей в правильном положении и быстро его изменять без дополнительного ортопедического оборудования. Ребенок может занять правильное положение сидя для приема пищи, учебы или игр. Взрослые благодаря этому устройству могут принимать пассивное положение стоя, выполнять упражнения и перемещаться при помощи близ-

ких [38]. Например, статично-динамично-реабилитационный вертикализатор *AKCESMED ПАРАМОБИЛЬ* (Польша) обеспечивает пассивную вертикализацию (от 0° до 90°) на начальных этапах реабилитации. Выпускается в 4 размерах [39].

PHYSIOMED Elektromedizin AG (Германия) производит кровать-вертикализатор *ANYMOV* с интегрированным роботизированным устройством, позволяющим проводить интенсивную моторную терапию в остром периоде и на ранних этапах реабилитации [40]. Кровать состоит из четырех секций, что позволяет осуществлять движение в любом направлении:

- вертикализация пациента с углом наклона стола от 0° до 85°;
- интенсивная двигательная терапия;
- циклическая нагрузка на нижние конечности;
- активная и пассивная нагрузка на нижние конечности;
- встроенная система электромиографии для функциональной оценки работы мышц;
- полный контроль и управление интенсивностью и скоростью движения робота;
- стандартизация терапевтических мероприятий и базы данных, благодаря встроенному программному обеспечению;
- плавное, безопасное и бесшумное движение с помощью 13 электродвигателей [41].

SHIFU OCEAN (*Fumagalli*, Италия) – это вертикализатор комбинированного типа для фиксации ребенка с детским церебральным параличом в вертикальном положении (с наклоном вперед или с наклоном назад). Устройство оснащено подголовником и абдуктором с регулировкой по высоте и глубине установки, а также фиксатором таза. Выпускается в трех размерах [42].

X-TEND (*Fumagalli*, Италия) позволяет постепенно уменьшать угол наклона от 50° до вертикального положения, плавно увеличивая нагрузку на нижние конечности. Инновация *X-TEND* – сохранение физиологического центра отведения ног (угол отведения – 24°), благодаря которому головка бедра поддерживаются в правильном положении в вертлужной впадине, при этом верхние конечности ребенка остаются полностью свободными [43].

Российский завод спортивного оборудования «Геркулес» выпускает кровать-вертикализатор с гидравлическим приводом, который позволяет перемещать тело пациента из горизонтальной плоскости в практически вертикальную (75°). Подъем осуществляется посредством гидравлического элемента с ручным приводом [44].

Заключение. Производство комплексов, предназначенных для роботизированной механотерапии, без сомнений, относится к высокотехнологичному (или наукоемкому) производству по ряду показателей: наукоемкость (отношение затрат на НИОКР к объему выпуска продукции превышает 3,5% [27]), сложность изделия, конкурентоспособность, участие высококвалифицированного труда и пр. При этом спрос на такую продукцию только растет, что подтверждается заинтересованностью государства развивать отечественное высокотехнологич-

ное оборудование, в том числе в системе здравоохранения [28]. Само производство представляет собой часть высокотехнологичного комплекса, который в функциональном отношении состоит из шести блоков различных предприятий и / или организаций (научные, научно-производственные, образовательные, инфраструктурные, управленические, социальные) [29]. Современные подходы к роботизированной механотерапии с элементами биоуправления и телемедицины, направленные на восстановление утраченных двигательных функций, наряду с конкурентными преимуществами имеют и ряд ограничений.

Так, сравнительный анализ функциональных возможностей этих тренажеров и тренажерных комплексов позволил выявить ряд ограничений для их широкого использования. В первую очередь стоит отметить большую стоимость роботизированных мультисуставных комплексов, а также необходимость оборудования специализированных помещений для их размещения (например, *Biodex Medical Systems* или *Lokomat*). Экономически доступные тренажеры стоимостью до 17 млн долларов США, отличающиеся доступностью и простотой использования, предназначены для формирования «плоских» движений, что лишь частично отражает анатомо-физиологические характеристики движения в суставах. Например, отсутствует возможность проведения вращений. Стоит отметить отсутствие возможности спаренной работы двух устройств для задей-

ствования здоровой конечности в процессе восстановления, возможности одновременного использования дополнительных факторов физиотерапии, способствующих восстановлению функций (например, теплопечение или вибротерапия), а также возможности использования телеметрии и телемедицины.

Аналогичный анализ функциональных возможностей вертикализаторов и мобильных комплексов также позволил выявить ряд ограничений. Безусловно, роботизированные мультисуставные вертикализаторы имеют большую стоимость, включая дорогостоящее обслуживание (например, *PHYSIOMED Elektromedizin AG* или *Erigo*). Экономически доступные вертикализаторы чаще всего предназначены для реабилитации детей. Они малоразмерны и перемещают тело в пространстве в диапазоне от 0° до 90° и не снабжены дополнительными функционалами. Отсутствует дополнительная возможность изменения положения тела, например перевод в положение сидя. Чаще всего вертикализаторы направлены на реабилитацию нижних конечностей, в то время как верхние конечности не вовлечены. Мультифункциональные комплексы для реабилитации как верхних, так и нижних конечностей одновременно требуют отдельного помещения, а также приобретения дополнительных модулей, что еще больше увеличивает их стоимость. Отсутствие простого интерфейса также осложняет использование этих комплексов в домашних условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физическая реабилитация / под ред. С.Н. Попова. М. : Academia, 2013. 304 с.
2. Восстановление подвижности конечностей при помощи роботизированной механотерапии // GIDMED.COM. URL: <http://gidmed.com/novosti/robotizirovannaja-mehanoterapija.html> (дата обращения: 25.04.2017).
3. Макарова М.Р. и др. Современные аспекты аппаратных методов реабилитации неврологических больных // Академический журнал Западной Сибири. 2013. Т. 9, № 3 (46). С. 60–61.
4. Нурманова Ш.А Роботизированная механизированная нейрореабилитация // Нейрохирургия и неврология Казахстана. 2013. № 1 (30). С. 3–6.
5. Даминов В.Д. Роботизированная механотерапия в нейрореабилитации // Вестник АГИУВ. 2013. № 3. С. 85–90.
6. Восстановление двигательной активности суставов с помощью аппаратов Артромот // OsteoCure.ru. URL: <http://osteocure.ru/tovar/apparat-artromot.html> (дата обращения: 25.04.2017).
7. Аппарат ARTROMOT-K1 // ORMED. URL: <http://www.ormed.com.ru/artromotk1.htm> (дата обращения: 25.04.2017).
8. ARTROMOT K1 (аппарат для разработки коленного и тазобедренного суставов) // ОРТОПЕНТ. URL: <https://www.ortorent.ru/product/artromot-k1> (дата обращения: 25.04.2017).
9. Руководство по применению ARTROMOT-K4 (начиная с серийного номера 10000 и выше). Germany, 2007. 31 с.
10. ARTROMOT® – семинар по CPM (продолжительная пассивная разработка суставов) // База данных hnu.docdat.com. URL: <http://hnu.docdat.com/docs/index-189546.html> (дата обращения: 25.04.2017).
11. Бухарин В.А., Крысиюк О.Б., Слухай С.И. Применение современных методов реабилитации при переломах нижних конечностей // Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта. 2014. № 3 (109). С. 43–45.
12. Подгорная О.В. и др. Возможности реабилитации детей с травмами конечностей после оперативного лечения // Доктор.Ру. 2015. № 15–16 (116–117). С. 77–80.
13. Емельянова М.А., Маркаров Г.С. Эффективность применения Артромота при переломах костей голени в нижней трети после оперативного лечения по данным электромиографии // Лечебная физическая культура: достижения и перспективы развития : материалы V Всероссий. науч.-практ. конф. с междунар. участием. 2016. С. 112–114.
14. Kinetec™ Spectra™ // МедКонтакт. URL: http://www.medkontakt.spb.ru/_catalog/rehabilitation/passivnaya-razrabotka-sustavov/1072/ (дата обращения: 25.04.2017).
15. Kinetec Performa knee CPM // BEKA. URL: <http://www.beka.ru/ru/katalog/passivnaya-razrabotka-sustavov-/kinetec-performa-knee-cpm/> (дата обращения: 25.04.2017).
16. Тренажеры для пассивной разработки суставов Kinetec // Национальный исследовательский центр здоровья детей. URL: <http://www.kdcenter.ru/rbt/content/trenazhery-dlya-passivnoj-razrabotki-sustavov-kinetec> (дата обращения: 25.04.2017).
17. Fisiotek 2000: Оборудование для физиотерапии и реабилитации. URL: <http://octomed.ru/details/Fisiotek-2000-rimec/> (дата обращения: 25.04.2017).
18. Аппарат для роботизированной механотерапии нижних конечностей модель Flex 01 для коленного и тазобедренного суставов // ORMED. URL: <http://www.ormed.ru/flex> (дата обращения: 25.04.2017).
19. Тренажер для пассивного воздействия на колено и бедро марки «ОРМЕД-FLEX» : руководство по эксплуатации. Уфа, 2016. 28 с.
20. Гиниятуллин М.Н. Высокотехнологичная реабилитация пациентов с заболеваниями опорно-двигательного аппарата посредством CPM-терапии // Лечебная физкультура и спортивная медицина. 2016. № 6 (138). С. 43–47.
21. LegTutor // Медицина и новые технологии. URL: <http://www.mednt.ru/catalog/reabilitacionnoe-oborudovanie/tutor/legtutor/> (дата обращения: 25.04.2017).

22. SYSTEM 4 PRO // Медиум Плюс : оборудование для восстановительного лечения, спортивной медицины и SPA. URL: http://www.mediumplus.ru/item_66.htm (дата обращения: 13.10.2017).
23. Комплекс механо-терапевтический мультистуловый System 4 PRO // УТБ Ресурс. URL: <http://utbresurs.com.ua/component/k2/mehanoterapevticheskij-kompleks-system-4-pro.html> (дата обращения: 13.10.2017).
24. Система CON-TREX // KELEANZ Medical. URL: <http://www.keleanz.ru/catalog/39/186/> (дата обращения: 13.10.2017).
25. Lokomat®Nanos // МедКонтакт. URL: <http://www.medkontakt.spb.ru/catalog/reabilitation/vosstanovlenie-navykov-khodby/1034/> (дата обращения: 13.10.2017).
26. Lokomat®Pro // БЕКА. URL: <http://www.beka.ru/ru/katalog/vosstanovlenie-navykov-khodby/lokomat-pro/> (дата обращения: 13.10.2017).
27. Энфенджян Т.А. Высокотехнологичный комплекс и обеспечение экономической безопасности России // Проблемы современной экономики. 2009. № 4. С. 440.
28. Будущее здравоохранения за высокотехнологичным отечественным производством // Медицинский алфавит. 2010. Т. 2, № 19. С. 4–5.
29. Многогрешнов А.И., Самохвалова С.М. Высокотехнологичный продукт и высокотехнологичное производство в практике современного менеджмента // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Т. 2, № 11. С. 715–717.
30. Основные производители реабилитационных тренажеров // Спортивные тренажеры. URL: <https://sportivnyetrenajery.ru/osnovnye-proizvoditeli-reabilitacionnyh-trenajerov-1.html> (дата обращения: 13.10.2017).
31. Вертикализаторы // Rehabmedical. URL: <https://rehabmedical.ru/katalog/vertikalizatory> (дата обращения: 22.10.2017).
32. Rifton Prone Standers // Rifton. URL: <https://www.rifton.com/products/standers/supine-standers> (дата обращения: 22.10.2017).
33. Вертикализатор мобильный Рифтон // Rehabmedical. URL: <https://rehabmedical.ru/katalog/vertikalizatory/vertikalizator-mobilnyj-rifton> (дата обращения: 22.10.2017).
34. EasyStand Evolv Glider Adult™ // DOCMEDRU. URL: <http://dokmed.ru/vertikalizatory/evolv-glider%E2%84%A2> (дата обращения: 22.10.2017).
35. EasyStand Evolv // EasyStand. URL: <https://easystand.com/product/mobile-2> (дата обращения: 22.10.2017).
36. Стол-вертикализатор ErigoBasic // БЕКА. URL: <http://www.beka.ru/ru/katalog/rannyyaya-aktivizatsiya-i-vertikalizatsiya/erigo/> (дата обращения: 22.10.2017).
37. Линия продуктов Erigo // Erigo ® URL: <https://www.hocoma.com/us/solutions/erigo/technical-data-sheet/> (дата обращения: 22.10.2017).
38. Изделия // Akces-med. URL: <http://ru.akces-med.com/product/> (дата обращения: 22.10.2017).
39. Многофункциональный вертикализатор ПАРАМОБИЛЬ // Akces-med. URL: <http://akces-med.ru/product/mnogofunktionalnyj-vertikalizator-paramobil/> (дата обращения: 22.10.2017).
40. Physiomed Elektromedizin AG (Германия) // PHYSIOMED. URL: <http://urlid.ru/b6be> (дата обращения: 22.10.2017).
41. Кровать-вертикализатор ANYMOV // Медицинские партнеры. URL: <http://www.mpamed.ru/fizioterapiya-i-reabilitatsiya/physiomed/593-anymov.htm> (дата обращения: 22.10.2017).
42. Вертикализатор для детей с ДЦП «SHIFU OCEAN» Fumagalli // Aura-med. URL: https://au-med.ru/xodunki/dly-detei-s-dcp/shifu_ocean (дата обращения: 22.10.2017).
43. Вертикализатор X-TEND Fumagalli // Сеть медицинских магазинов Доброта.ru. URL: https://www.dobrota.ru/shop/UID_401_vertikalizator_xtend_fumagalli.html (дата обращения: 22.10.2017).
44. Вертикализатор мобильный A-5041 HERCULES научно-производственное объединение. URL: <https://royal-sport.ru/trenazhery/trenazhery-dlja-invalidov/parapodiumy-i-vertikalizatory/vertikalizator-mobilnyj-5041> (дата обращения: 22.10.2017).

Статья представлена научной редакцией «Педагогика» 5 декабря 2017 г.

MODERN APPROACHES TO ROBOTIC MECHANOTHERAPY WITH ELEMENTS OF BIO-MANAGEMENT AND TELEMEDICINE FOR THE RESTORATION OF LOST MOTOR FUNCTIONS

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta – Tomsk State University Journal, 2018, 433, 127–134.

DOI: 10.17223/15617793/433/18

Elena A. Baranova, Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: elena4408@yandex.ru

Yulia P. Bredikhina, Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: u2000@yandex.ru

Anastasia V. Kabachkova, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: avkabachkova@gmail.com

Yulia G. Kalinnikova, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: kalinnikova@gmail.com

Vyacheslav K. Pashkov, Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: pashkovvk@tpu.ru

Keywords: motor adaptation; robotized mechanotherapy; biofeedback; robotic simulator; passive verticalization; verticalizer.

At present, motor adaptation and restoration of lost motor functions in a shorter period is an important economic task. Rehabilitation of patients with impaired motor functions is a time-consuming, lengthy and multi-stage process that requires the colossal powers of the instructor, the patient and their environment. Therefore, the use of automated technology can increase the intensity of the therapy and the quality of training in comparison with the classical curative gymnastics without attracting additional funds. Today, a wide range of rehabilitation devices is being manufactured in different countries of the world – from the simplest devices to the most complex diagnostic and robotic complexes using the latest achievements of science and technology. The production of robotic mechanotherapy complexes, without a doubt, is a science-intensive and high-tech production. Unfortunately, for today, the demand for such products is only growing. Modern approaches to robotic mechanotherapy with elements of biocontrol and telemedicine aimed at restoring lost motor functions, along with competitive advantages, have a number of limitations. Thus, a comparative analysis of the functional capabilities of these simulators has shown a number of limitations for their wide application. First, the high cost of robotic multi-joint complexes, as well as the need for specially equipped premises for their placement, is worth noting. Cost-effective simulators costing up to \$ 17 million differ in accessibility and ease of use, but they are intended for the formation of “flat” movements, which only partially reflects the anatomical and physiological characteristics of motion in the joints, since there is no possibility of rotations. There is no possibility of two devices working for the use of a healthy limb in the process of recovery, there is no possibility of simultaneous use of additional factors of physiotherapy that contribute to the restoration of functions (for example, heat therapy or vibration therapy), and there is no possibility to use telemetry and telemedicine technologies. A similar analysis of the functionality of verticalizers and mobile complexes has also revealed a number of limitations. Undoubtedly, robotic multi-joint verticalizers have a high cost and expensive maintenance. Economically accessible verticalizers are most often intended for the rehabilitation of children. They are small in size and move the body in space in a range from 0 to 90 degrees and are not equipped with additional functions. Most often verticalizers are aimed at rehabilitation of the lower extremities, and the upper limbs are not involved. Multi-functional complexes for the rehabilitation of upper and lower limbs simultaneously require a separate room, as well as the purchase of additional modules, which further increases their cost. The lack of a simple interface also complicates the use of these complexes

at home. However, the undoubtedly advantage of robot therapy is a higher quality of training than classical gymnastics due to their longer duration, the accuracy of repetitive cyclic movements, the constant training program, the availability of tools for assessing the success of the sessions with the possibility of demonstrating to the patient, etc.

REFERENCES

1. Popov, S.N. (ed.) (2013) *Fizicheskaya reabilitatsiya* [Physical rehabilitation]. Moscow: Academia.
2. GIDMED.COM. (n.d.) *Vosstanovlenie podvizhnosti konechnostey pri pomoshchi robotizirovannoy mehanoterapii* [Restoration of limb mobility with the help of robotic mechanotherapy]. [Online] Available from: <http://gidmed.com/novosti/robotizirovannaja-mehanoterapija.html>. (Accessed: 25.04.2017).
3. Makarova, M.R. et al. (2013) Sovremennye aspekty apparatnykh metodov reabilitatsii nevrologicheskikh bol'nykh [Modern aspects of apparatus methods of rehabilitation of neurological patients]. *Akademicheskiy zhurnal Zapadnoy Sibiri*. 9:3 (46), pp. 60–61.
4. Nurmanova, Sh.A. (2013) Robotizirovannaya mekhanizirovannaya neyroreabilitatsiya [Robotic mechanized neurorehabilitation]. *Neyrokhirurgiya i nevrologiya Kazakhstana*. 1 (30). pp. 3–6.
5. Daminov, V.D. (2013) Robotizirovannaya mekhanoterapiya v neyroreabilitatsii [Robotic mechanotherapy in neurorehabilitation]. *Vestnik AGIUV*. 3. pp. 85–90.
6. OsteoCure.ru. (n.d.) *Vosstanovlenie dvigatel'noy aktivnosti sostavov s pomoshch'yu apparatov Artromot* [Restoration of motor activity of joints with the help of Artromot devices]. [Online] Available from: <http://osteocure.ru/tovar/apparat-artromot.html>. (Accessed: 25.04.2017).
7. ORMED. (n.d.) *Apparat ARTROMOT-K1* [ARTROMOT-K1 device]. [Online] Available from: <http://www.ormed.com.ru/artromotk1.htm>. (Accessed: 25.04.2017).
8. ORTORENT. (n.d.) *ARTROMOT K1* (apparat dlya razrabotki kolenogo i tazobedrennogo sostavov) [ARTROMOT K1 (device for developing the knee and hip joints)]. [Online] Available from: <https://www.ortorent.ru/product/artromot-k1>. (Accessed: 25.04.2017).
9. Anon. (2007) *Rukovodstvo po primeneniyu ARTROMOT-K4 (nachinaya s seriyogo nomera 10000 i vyshе)* [Manual on the use of ARTROMOT-K4 (starting with serial number 10,000 and above)]. Germany: [s.n.].
10. Hnu.docdat.com. (n.d.) *ARTROMOT® – seminar po SRM (prodolzhitel'naya passivnaya razrabortka sostavov)* [ARTROMOT® – workshop on CPM (continuous passive motion)]. [Online] Available from: <http://hnu.docdat.com/docs/index-189546.html>. (Accessed: 25.04.2017).
11. Bukharin, V.A., Krysyuk, O.B. & Slukhay, S.I. (2014) Applications of the modern methods of rehabilitation at fractures of the bottom extremities. *Uchenye zapiski universiteta im. P.F. Lesgafta*. 3 (109). pp. 43–45. (In Russian). DOI: 10.5930/issn.1994-4683.2014.03.109.p43-45
12. Podgornaya, O.V. et al. (2015) Vozmozhnosti reabilitatsii detey s travmami konechnostey posle operativnogo lecheniya [The possibilities of rehabilitation of children with limb injuries after surgical treatment]. *Doktor.Ru*. 15–16 (116–117). pp. 77–80.
13. Emel'yanova, M.A. & Markarov, G.S. (2016) [Efficacy of the use of Artromot in fractures of the lower leg bones in the lower third after surgical treatment according to electromyography]. *Lechebnaya fizicheskaya kul'tura: dostizheniya i perspektivy razvitiya* [Medical physical culture: achievements and development prospects]. Proceedings of the 5th all-Russian Conference. Omsk: [s.n.]. pp. 112–114. (In Russian).
14. MedKontakt. (n.d.) *Kinetec™ Spectra™*. [Online] Available from: http://www.medkontakt.spb.ru/_catalog/rehabilitation/passivnaya-razrabortka-sustavov/1072/. (Accessed: 25.04.2017). (In Russian).
15. BEKA. (n.d.) *Kinetec Performa knee CPM*. [Online] Available from: <http://www.beka.ru/ru/katalog/passivnaya-razrabortka-sustavov-/kinetec-performa-knee-cpm/>. (Accessed: 25.04.2017).
16. National Research Center for Children's Health. (n.d.) *Trenazhery dlya passivnoy razrabortki sostavov Kinetec* [Kinetec simulators for passive joint development]. [Online] Available from: <http://www.kdcenter.ru/rbt/content/trenazhery-dlya-passivnoj-razrabortki-sustavov-kinetec>. (Accessed: 25.04.2017).
17. Octomed.ru. (n.d.) *Fisiotek 2000: Oborudovanie dlya fizioterapii i reabilitatsii* [Fisiotek 2000: Equipment for physiotherapy and rehabilitation]. [Online] Available from: <http://octomed.ru/details/Fisiotek-2000-rimec/>. (Accessed: 25.04.2017).
18. ORMED. (n.d.) *Apparat dlya robotizirovannoy mehanoterapii nizhnikh konechnostey model' Flex 01 dlya kolenogo i tazobedrennogo sostavov* [Device for robotic mechanotherapy of lower extremities model Flex 01 for knee and hip joints]. [Online] Available from: <http://www.ormed.ru/flex>. (Accessed: 25.04.2017).
19. Anon. (2016) *Trenazher dlya passivnogo vozdeystviya na koleno i bedro marki "ORMED-FLEX": rukovodstvo po ekspluatatsii* [The "ORMED-FLEX" simulator for passive influence on the knee and the hip: instruction manual]. Ufa: [s.n.].
20. Giniyatullin, M.N. (2016) *Vysokotekhnologichnaya reabilitatsiya patsientov s zabolевaniyami oporno-dvigatel'nogo apparata posredstvom SRM-terapii* [High-tech rehabilitation of patients with diseases of the musculoskeletal system through CPM-therapy]. *Lechebnaya fizkul'tura i sportivnaya meditsina*. 6 (138). pp. 43–47.
21. Mednt.ru. (n.d.) *LegTutor*. [Online] Available from: <http://www.mednt.ru/catalog/reabilitacionnoe-oborudovanie/tutor/legtutor/>. (Accessed: 25.04.2017). (In Russian).
22. Medium Plyus. (n.d.) *SYSTEM 4 PRO*. [Online] Available from: http://www.mediumplus.ru/item_66.htm. (Accessed: 13.10.2017). (In Russian).
23. UTB Resurs. (n.d.) *Kompleks mekhano-terapeuticheskij mul'tisustavnyy System 4 PRO* [System 4 PRO: a mechanic-therapeutic multi-joint complex]. [Online] Available from: <http://utbresurs.com.ua/component/k2/mehano-terapeuticheskij-kompleks-system-4-pro.html>. (Accessed: 13.10.2017).
24. KELEANZ Medical. (n.d.) *Sistema CON-TREX* [CON-TREX system]. [Online] Available from: <http://www.keleanz.ru/catalog/39/186/>. (Accessed: 13.10.2017).
25. MedKontakt. (n.d.) *Lokomat®Nanos*. [Online] Available from: http://www.medkontakte.spb.ru/_catalog/rehabilitation/vosstanovlenie-navykov-khodby/1034/. (Accessed: 13.10.2017). (In Russian).
26. BEKA. (n.d.) *Lokomat®Pro*. [Online] Available from: <http://www.beka.ru/ru/katalog/vosstanovlenie-navykov-khodby/lokomat-pro/>. (Accessed: 13.10.2017). (In Russian).
27. Enfendzhyan, T.A. (2009) *Vysokotekhnologichnyy kompleks i obespechenie ekonomicheskoy bezopasnosti Rossii* [High-tech complex and ensuring economic security of Russia]. *Problemy sovremennoy ekonomiki*. 4. pp. 440.
28. Meditsinskiy alfavit. (2010) Budushchee zdravookhraneniya za vysokotekhnologichnym otechestvennym proizvodstvom [The future of health care belongs to high-tech Russian products]. *Meditinskii alfavit*. 2(19). pp. 4–5.
29. Mnogogreshnov, A.I. & Samokhalova, S.M. (2015) High-technology product and high-technology industries in the modern management practice. *Aktual'nye problemy aviatii i kosmonavtiki*. 2(11). pp. 715–717. (In Russian).
30. Sportivnye trenazhery. (n.d.) *Osnovnye proizvoditeli reabilitatsionnykh trenazherov* [The main manufacturers of rehabilitation simulators]. [Online] Available from: <https://sportivnyetrenajery.ru/osnovnye-proizvoditeli-reabilitacionnyh-trenajerov-1.html>. (Accessed: 13.10.2017).
31. Rehabmedical. (n.d.) *Vertikalizatory* [Verticalizers]. [Online] Available from: <https://rehabmedical.ru/katalog/vertikalizatory>. (Accessed: 22.10.2017).
32. Rifton. (n.d.) *Rifton Prone Stander*. [Online] Available from: <https://www.rifton.com/products/standers/supine-standers>. (Accessed: 22.10.2017).
33. Rehabmedical. (n.d.) *Vertikalizator mobil'nyy Rifton* [Rifton mobile verticalizer]. [Online] Available from: <https://rehabmedical.ru/katalog/vertikalizatory/vertikalizator-mobilnyj-rifton>. (Accessed: 22.10.2017).
34. DOCMEDRU. (n.d.) *EasyStand Evolv Glider Adult™*. [Online] Available from: <http://dokmed.ru/vertikalizatory/evolv-glider%2E2%84%A2>. (Accessed: 22.10.2017). (In Russian).

35. EasyStand. (n.d.) *EasyStand Evolv*. [Online] Available from: <https://easystand.com/product/mobile-2>. (Accessed: 22.10.2017).
36. BEKA. (n.d.) *Stol-vertikalizator ErgoBasic* [ErgoBasic verticalizer table]. [Online] Available from: <http://www.beka.ru/ru/katalog/rannyaya-aktivizatsiya-i-vertikalizatsiya/erigo/>. (Accessed: 22.10.2017).
37. Ergo ®. (n.d.) *Liniya produktov Ergo* [Ergo product line]. [Online] Available from: <https://www.hocoma.com/us/solutions/ergo/technical-data-sheet/>. (Accessed: 22.10.2017).
38. Akces-med. (n.d.) *Izdeliya* [Products]. [Online] Available from: <http://ru.akces-med.com/product/>. (Accessed: 22.10.2017).
39. Akces-med. (n.d.) *Mnogofunktional'nyy vertikalizator PARAMOBIL*” [PARAMOBIL multifunctional verticalizer]. [Online] Available from: <http://akces-med.ru/product/mnogofunktionalnyj-vertikalizator-paramobil/>. (Accessed: 22.10.2017).
40. PHYSIOMED. (n.d.) *Physiomed Elektromedizin AG (Germaniya)* [Physiomed Elektromedizin AG (Germany)]. [Online] Available from: <http://urlid.ru/b6be>. (Accessed: 22.10.2017).
41. Mpamed.ru. (n.d.) *Krovat'-vertikalizator ANYMOV* [ANYMOV verticalizer bed]. [Online] Available from: <http://www.mpamed.ru/fizioterapiya-i-reabilitatsiya/physiomed/593-anymov.htm>. (Accessed: 22.10.2017).
42. Aura-med. (n.d.) *Vertikalizator dlya detey s DTsP “SHIFU OCEAN” Fumagalli* [SHIFU OCEAN Fumagalli verticalizer for children with cerebral palsy]. [Online] Available from: https://au-med.ru/xodunki/dly-detei-s-dcp/shifu_ocean. (Accessed: 22.10.2017).
43. Dobrota.ru. (n.d.) *Vertikalizator X-TEND Fumagalli* [X-TEND Fumagalli verticalizer]. [Online] Available from: https://www.dobrota.ru/shop/UID_401_vertikalizator_xtend_fumagalli.html. (Accessed: 22.10.2017).
44. HERCULES. (n.d.) *Vertikalizator mobil'nyy A-5041* [A-5041 mobile verticalizer]. [Online] Available from: <https://royalsport.ru/trenazhery/trenazhery-dlya-invalidov/parapodiumy-i-vertikalizatory/vertikalizator-mobilnyj-5041>. (Accessed: 22.10.2017).

Received: 05 December 2017