

Роботизированные и механотерапевтические устройства для восстановления функции руки после инсульта

К.м.н. А.С. Клочков, профессор Л.А. Черникова

ФГБУ «Научный центр неврологии» РАМН, Москва

Высокая распространенность цереброваскулярных заболеваний позволяет считать острые нарушения мозгового кровообращения одним из основных факторов инвалидизации населения. Согласно последним статистическим данным, количество потерянных лет жизни вследствие нетрудоспособности и преждевременной смертности (DALY) на 100 тыс. населения в Российской Федерации составляет 2893,43 [9]. Более 30% переживших инсульт пациентов даже после успешно проведенной реабилитации нуждаются в посторонней помощи и уходе.

Пациенты со снижением моторной функции руки значительно ограничены в своей повседневной социальной и бытовой активности. Наряду с мобильностью восстановление движений в руке у пациентов, перенесших инсульт, является одним из ключевых условий для самообслуживания пациента и возвращения к трудовой и профессиональной деятельности. Согласно многочисленным авторам [7, 15], полноценное восстановление движений руки происходит лишь в 20% случаев. Причиной этого может служить ряд типичных проблем, с которыми специалисты сталкиваются при восстановлении движений в руке. К таким проблемам можно отнести отсутствие у пациента мотивации к тренировкам, ограниченные человеческие ресурсы, которые могут быть задействованы в процессе лечения, а также возникновение вторичных осложнений, таких как постинсультная артропатия плечевого сустава и мышечные контрактуры. Для большинства пациентов такие, казалось бы, простые вещи, как причесывание, чистка зубов и прием пищи становятся практически невозможными, и они начинают использовать только здоровую руку, тем самым исключая нагрузки на паретичную руку и создавая все условия для развития контрактур. У пациентов с выраженными и грубыми парезами нередко наблюдаются депрессия, апатия, нежелание тренироваться, отрицание собственного реабилитационного потенциала. На ранней стадии инсульта, когда восстановление утраченной функции происходит наиболее интенсивно, возникновение подобных проблем приводит к снижению интенсивности реабилитации и зачастую является причиной ее недостаточной эффективности.

Верхняя конечность человека считается наиболее развитым и эффективным инструментом-органом, представляя собой сложную кинематическую цепь, состоящую из суставов плечевого пояса, локтевого и лучезапястного суставов, а также суставов кисти. Самым мобильным суставом во всем человеческом теле является плечевой сустав, обладающий тремя степенями свободы, что позволяет ему совершать движения в трех плоскостях и по отношению к трем основным осям. Мобильность плечевого сустава, помимо возможности к самообслуживанию, также обеспечивает функцию захвата (reaching), позволяя дотягиваться до отдаленных пред-

метов и обеспечивая наиболее удобное положение кисти для непосредственного захвата предмета [1]. Локтевой сустав выполняет две различные функции: сгибание/разгибание и пронацию/супинацию. Локтевой сустав обеспечивает механическую связь между плечом и предплечьем. Наличие локтевого сустава дает возможность дотянуться кистью до области плечевого сустава и рта.

Для успешного восстановления функции руки применяется комплекс физических упражнений, состоящий из набора упражнений, направленных на:

- усиление мышечной силы и увеличение объема движений в суставах;
- снижение и нормализацию повышенного мышечного тонуса;
- устранение патологических содружественных движений;
- улучшение координационных возможностей;
- уменьшение расстройств чувствительности;
- обучение комплексным навыкам бытового самообслуживания.

Современная теория двигательного обучения построена на системной модели двигательного контроля, основываясь на которой были разработаны новые подходы в кинезотерапии, в частности теория целенаправленного двигательного обучения, или task-oriented approach. Данный метод, в отличие от традиционных подходов, направленных на восстановление отдельных движений и функций, ориентирован на тренировку и восстановление определенной двигательной задачи [2].

Одной из методик, призванных интенсифицировать двигательное обучение, является метод принудительной, или форсированной, тренировки (constraint induced therapy). Данный метод заключается в том, что здоровую руку пациента фиксируют, исключая возможность пользоваться ей при ежедневной деятельности, тем самым принуждая его активнее пользоваться пораженной рукой. В настоящее время эффективность данной методики не вызывает сомнений, однако применение ее возможно только у пациентов с легким и умеренными парезами. Проблема реабилитации пациентов с грубыми двигательными нарушениями явилась своеобразным толчком для разработки роботизированных и механотерапевтических устройств.

Для комплексной аппаратной реабилитации руки в настоящее время применяется широкий спектр роботизированных и механотерапевтических устройств. Данные аппараты можно условно разделить на две основные категории: роботизированные и механотерапевтические. **Роботизированными** являются устройства, снабженные двигателями для обеспечения необходимого движения или помощи, обладающие антропоморфностью (схожестью с живым организмом или его частью), а также интерактивностью, т. е. способностью изменять стереотип своей работы в зависимости от

условий окружающей среды, основываясь на показателях встроенных датчиков. **Механотерапевтическими** являются тренажеры, обладающие двигателями для обеспечения запрограммированного движения, также они могут быть снабжены датчиками и использовать принцип биологической обратной связи.

Толчком к развитию роботизированных и механотерапевтических устройств стала проблема тренировки пациентов с грубыми парезами и необходимость в устройстве, обеспечивающем разгрузку веса паретичной руки для полноценной тренировки активных движений.

Одной из первых подобных технологий стал разработанный в середине 90-х гг. XX века аппарат MIT-Manus [4], осуществлявший гравитационную разгрузку руки пациента и отображавший траекторию движения руки пациента на экране монитора.

Обеспечение целенаправленного двигательного обучения движениям требует от применяемых роботизированных и механотерапевтических устройств максимального соответствия анатомическим и биомеханическим особенностям руки, в связи с чем возникла необходимость создания механотерапевтических устройств с экзоскелетной конструкцией.

В начале 2000-х гг., с создания устройств ARM-guide и T-WREX, началась эра реабилитационных экзоскелетов руки. Данные устройства представляют собой экзоскелет руки, который разгружает вес паретичной руки, и с помощью отображаемой на экране монитора обратной связи позволяет оценивать и тренировать траекторию ее движений. Также существуют модели роботизированных устройств для билатеральной тренировки обеих рук. В 2000 г. Burgar и соавт. из Стэнфордского университета представили модель бимануального робота MIME (Mirror-Image Motion Enabler) [11], в которой паретичная рука имитировала действие здоровой. Так же, как и в предыдущей модели, роботы использовались для тренировки проксимальных отделов руки (плеча, локтя и предплечья).

Среди множества активно применяемых в настоящее время технологий особого внимания заслуживает система Armeo [13], созданная на базе экзоскелета ARMIN. Экзоскелетный комплекс Armeo построен по принципу экзоскелета, и одной из основных его особенностей является разгрузка веса руки с помощью пружинного тяга, позволяющая тренироваться даже пациентам с минимальным объемом активных движений. Все тренировки проводятся в виртуальной среде под контролем биологической обратной связи. В комплекс тренировочных заданий включены программы, имитирую-

щие повседневную бытовую активность, таким образом, сама концепция данного устройства соответствует современным теориям двигательного обучения (task oriented approach). Очередным эволюционным шагом развития данной системы стал роботизированный комплекс Armeo Power, основанный на базе ARMIN 3, снабженный электроприводами [12] (рис. 1).

Armeo Power не просто разгружает вес пораженной руки, но также может обеспечивать интерактивную поддержку при выполнении упражнений. Двигатели, установленные в плечевом, локтевом и лучезапястном суставах, автоматически включаются, если у пациента не хватает сил для выполнения поставленной задачи. Наличие электроприводов открывает и принципиально новые возможности для тренировки пациентов с парезами и грубыми парезами. Кинезитерапевт может выполнить пассивное движение руки пациента любой сложности и длительности, а после этого Armeo Power с точностью повторяет заданное движение в течение любого времени, тем самым обеспечивая циклическую комплексную пассивную разработку суставов паретичной руки, что может служить эффективным методом для разработки и профилактики контрактур.

Еще одним примером эволюции реабилитационных технологий являются **устройства с интегрированной функциональной электростимуляцией**. Обычная и даже функциональная нервно-мышечная электростимуляция применяется в восстановительном лечении уже давно, но в последние годы технология позволила интегрировать функциональную электростимуляцию в роботизированные и механотерапевтические технологии. В частности, коллективом китайских ученых в 2011 г. был создан роботизированный ортез для запястья с интегрированной функциональной электростимуляцией. В настоящее время полноценных экзоскелетных систем для руки со встроенной интерактивной системой функциональной электростимуляции не существует, в то же время активная работа над прототипами позволяет ожидать их появления в ближайшем будущем. Однако среди реабилитационных технологий существуют механотерапевтические устройства, снабженные интерактивной функциональной электростимуляцией. Примером может послужить тренажер RT300, построенный на базе велоэргометра с возможностью тренировок как верхних, так и нижних конечностей и функциональной 6-канальной электростимуляцией, полностью интерактивной во время тренировки [5]. Интенсивность стимуляции выбранных мышц напрямую зависит от активности пациента, а система динамической нагрузки позволяет проводить тренировку пациентам как с парезами, так и с парезами различной степени выраженности.

Особую сложность во время двигательной реабилитации руки вызывает восстановление мелкой моторики кисти. Филогенетически сформировавшаяся форма кисти выполняет статическую, динамическую и сенсорную функции. Вытянутая вперед рука, открытая, с прямыми пальцами служит лопатой, совком; согнутые пальцы – крючком, щипцами. Более сложная функция – захват. При выполнении захвата человек в зависимости от цели движения, от характера объекта (размер, масса, форма, консистенция) образует из кисти новый механизм, создает новые позы. В основе разнообразных движений лежат шесть видов захвата: крючковой, межпальцевой, плоскостной, щипковый, цилиндрический, шаровой. Точность, прочность захвата осуществляется не только всеми отделами кисти – пальцами, кистью, запястьем, но в значительной мере зависит от функции надплечья, плеча, локтя, предплечья. Захватывание и удержание



Рис. 1. Роботизированный комплекс Armeo Power, Носота (Швейцария) с биологической обратной связью

предметов – это сложный двигательный акт, который состоит из ряда подготовительных моментов [3].

Некоторые их существующих роботизированных и механотерапевтических тренажеров имеют возможность тренировать цилиндрический захват кисти посредством датчиков в рукоятке устройства и системы биологической обратной связи. Однако у пациентов с высоким мышечным тонусом в сгибателях пальцев и отсутствием активного разгибания пальцев тренировка на данных тренажерах становится невозможной. Для роботизированной тренировки функции цилиндрического захвата в 2009 г. был разработан реабилитационный робот-экзоскелет руки (Hand Exoskeleton Rehabilitation Robot – HEXORR), предназначенный для разработки всех пальцев руки и возвращения пальцам кисти полного объема движений [14]. HEXORR может осуществлять как пассивную тренировку, так и пассивно/активную, во время которой двигатели работают во вспомогательном режиме, оценивая с помощью датчиков-потенциометров, какую именно помощь необходимо оказать пациенту для достижения полного объема сгибания или разгибания. К сожалению, обладая всего двумя двигателями: один для большого пальца и второй для остальных, HEXORR не позволяет тренировать более сложные варианты межпальцевых захватов. Также, являясь исключительно экзоскелетом кисти, тренировка захвата как части комплексного движения руки, в сочетании, к примеру, с одновременным выпрямлением руки, также невозможна. В 2010 г. на базе HandSOME (Hand Spring Operated Movement Enhancer) для тренировки функции захвата и расслабления, при помощи пассивного разгибания пальцев, был создан модуль Manovo Spring [8]. Используемый совместно с механотерапевтическим комплексом Armeo Spring Manovo помогает пациенту разгибать пальцы после активного захвата, используя регулируемую пружинную тягу. Благодаря регулируемой степени помощи разгибателям пальцев Manovo позволяет проводить активную/пассивную тренировку функции захват/расслабление (рис. 2).

Особенностью Manovo Spring является сочетание с механотерапевтической тренировкой проксимальных отделов руки, таким образом, цилиндрический захват можно тренировать как элемент комплексного движения руки, например, дотянуться до предмета, взять и, удерживая, перенести на другое место.

Большинство тренажеров и роботизированных устройств, предназначенных для тренировки мелкой моторики кисти, имеют вид экзоскелета, снабженного электро- или пневмоприводами для каждого пальца.



Рис. 2. Модуль Manovo Spring, Носота (Швейцария) для пассивного разгибания пальцев

Отличительной особенностью устройств для тренировки мелкой моторики кисти является наличие привода или двигателя для каждого пальца руки. Как правило, подобные устройства представляют собой экзоскелет и выполнены в форме перчатки, которая может быть как с жесткой, так и мягкой конструкцией. Экзоскелет предплечья и кисти SCRIPT [6] представляет собой пассивный ортез, в котором помощь движению осуществляется с помощью пружин и эластичных тяг. Ортез снабжен датчиками гониометрии и потенциометрами, что позволяет использовать не только биологическую обратную связь, но и проводить оценку движений и динамику реабилитации. К мягким экзоскелетам относится перчатка GloReha [18], отличительной особенностью которой служит открытая ладонная поверхность, что позволяет сохранить тактильный контакт с предметом во время выполнения пассивных бытовых упражнений. Восстановление глубокой и поверхностной чувствительности является неотъемлемой частью реабилитации функции руки. Именно нарушение чувствительности значительно ограничивает возможность использования пораженной руки даже при восстановлении двигательной функции. В 2011 г. коллективом авторов был разработан роботизированный тренажер, предназначенный исключительно для восстановления чувствительности в дистальных отделах руки и пальцах. Robotic sensory trainer использует вибрационные двигатели под подушечками пальцев, проксимальными фалангами и проксимальной частью ладони, а также датчики силы, расположенные под каждым пальцем и под ладонью. Тренировка проводится под контролем биологической обратной связи, при этом паретичная рука скрыта от пациента [10]. Стоит упомянуть, что не все роботизированные устройства для тренировки мелкой моторики имеют вид экзоскелета. Роботизированная система Amadeo предназначена для активного, пассивного и ассистирующего тренинга функции кисти и мелкой моторики [16]. Amadeo обладает 5-ю движимыми каретками, к которым с помощью магнитных подушечек закрепляется кисть и пальцы пациента (рис. 3). К плюсам данной конструкции можно отнести универсальность для пациентов с различным размером ладони и детей. На основе биологической обратной связи в Amadeo реализованы также программы для тренировки проприоцептивной чувствительности и упражнения для тренировки изолированного движения в отдельном пальце вне патологической двигательной синергии.

Несмотря на широкий спектр роботизированных устройств и значительно возросшие возможности со-



Рис. 3. Роботизированный тренажер Amadeo, Tyromotion (Голландия)

временной реабилитации, далеко не всегда удается полностью восстановить утраченную функцию руки. Необходимость в индивидуальной независимости таких пациентов наряду с теорией СИ-терапии привела к возникновению принципиально нового вида технологий – ассистирующие роботы.

Ассистирующие роботы не предназначены для восстановления функции, их задача – обеспечить необходимую помощь пациенту для полноценного выполнения требуемой задачи. Как правило, подобные устройства применяются для выполнения ежедневных бытовых нужд, обеспечивая определенный процент помощи для самостоятельного выполнения поставленной задачи. В случае, если объем активных движений в руке значительно ограничен, используются роботизированные манипуляторы, управляемые пациентом; они полностью выполняют необходимые для пациента действия.

В 1987 г. М. Topping разработал первый роботизированный манипулятор Handy I, целью которого было облегчение процесса питания пациентов с детским церебральным параличом [17]. Манипулятор, созданный в рамках проекта R.A.I.L. (Robotic Aid to Independent Living) и управляемый самим пациентом, помогал ему есть, пить, чистить зубы и бриться.

Благодаря развитию технологий современные роботизированные манипуляторы гораздо компактнее, многофункциональнее, а также, что немаловажно для индивидуального использования на дому, – более доступны в финансовом плане. Из производимых в настоящее время манипуляторов можно выделить Bestic (Швеция, 2004), который представляет собой настольный аппарат для кормления пациента. Управляемый кнопками, джойстиком или ножной педалью Bestic может зачерпывать ложкой жидкую или твердую пищу из установленной тарелки и подносить ложку ко рту пациента (рис. 4).

Одним из основных минусов данного рода манипуляторов является узкая специализация: для каждого вида деятельности требуется отдельное устройство, подготовка устройства к работе и любая задача вне его функции (налить воду в чашку, приготовить еду, положить в тарелку



Рис. 4. Индивидуальный бытовой манипулятор Bestic

и т. д.) зачастую требуют постороннего вмешательства. Решением данной проблемы может стать применение мобильных «носимых» многофункциональных манипуляторов с 3-мя и более степенями свободы. Существующие модели подобного вида ассистирующих манипуляторов позволяют выполнять практически весь спектр основных функций верхней конечности. Среди значительного количества данных устройств стоит отдельно выделить манипулятор iARM («Exact Dynamics», Голландия) и его более позднюю вариацию JACO («Kinova», Канада, 2009 г.).

Данные аппараты могут быть как стационарными, установленными на стол, так и мобильными, интегрированными в инвалидное кресло с электроприводом. Управление манипулятором осуществляется рукой или ртом пациента с помощью джойстика. В настоящее время уже идет работа над прототипом роботизированного манипулятора, управляемого с помощью мозг-компьютер интерфейса (B.C.I. – brain computer interface). При достаточной точности анализа ЭЭГ-сигналов эти устройства, получив более точное и быстрое управление, могут практически заменить пациенту руку.

Однако полностью заменять пораженную руку манипулятором нужно далеко не всегда. При наличии минимальных произвольных движений достаточно разгрузить собственный вес руки, создав эффект невесомости, для того чтобы пациент мог активно использовать пораженную руку в полном объеме. Устройством данного типа является система динамической разгрузки руки Edego, произведенная компанией ARMON (Голландия). Снабженная пружинной разгрузкой веса руки, система может устанавливаться на кресло пациента и помогать в выполнении ежедневных бытовых нужд: есть, пить, причесываться, поднимать предметы и т. д.

Практический опыт применения роботизированной и механотерапии позволил определить некоторые требования и рекомендации к высокотехнологичной двигательной реабилитации:

- помощь роботизированных устройств должна быть минимальной;
- высокая мотивация пациента;
- разнообразие программ тренировок, использование биологической обратной связи;
- регулярная оценка моторной функции с последующей коррекцией нагрузки;
- избегать монотерапии.

Существующие роботизированные технологии позволяют проводить максимально эффективную кинезиотерапию практически всех изолированных и комплексных движений руки, в т. ч. и целенаправленных. Развитие технологий и расширение ассортимента данных устройств делают их более компактными и экономически доступными для индивидуальных пациентов. У пациентов появляется возможность продолжить курс активной комплексной реабилитации на дому, после выписки из стационара, что может значительно ускорить восстановление двигательной функции руки.

Литература

1. Капанджи А.И. Верхняя конечность. Физиология движений суставов: пер с англ. Г.М. Абе-левой М.: Эксмо, 2009. 368 с.
2. Усольцева Е.В., Машкара К.И. Хирургия заболеваний кисти, изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Медицина, 1978. 336 с.
3. Черникова Л.А. Новые технологии в реабилитации больных, перенесших инсульт // Атмосфера. 2005. № 2. С. 32–35.
4. Aisen M.L., Krebs H.I., Hogan N. et al. The effect of robot-assisted therapy and rehabilitative training on motor recovery following stroke // Arch. Neurol. 1997. Vol. 4. P. 443–446.

Полный список литературы Вы можете найти на сайте <http://www.rmj.ru>