

РАЗРАБОТКА И КЛИНИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ ПАССИВНОГО ЭКСОСКЕЛЕТА ВЕРХНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ «ЭКЗАР»

DOI: 10.17691/stm2016.8.2.13

УДК 616.717:615.477

Поступила 9.02.2016 г.



А.А. Воробьев, д.м.н., профессор, зав. кафедрой оперативной хирургии и топографической анатомии¹;
руководитель отдела экспериментальной и клинической хирургии²;

Ф.А. Андрищенко, к.м.н., старший научный сотрудник лаборатории моделирования патологии²;

О.А. Пономарева, к.м.н., старший преподаватель кафедры оперативной хирургии
и топографической анатомии¹; младший научный сотрудник лаборатории моделирования патологии²;

И.О. Соловьева, студент 6-го курса педиатрического факультета¹;

П.С. Кривоножкина, к.м.н., ассистент кафедры неврологии, нейрохирургии с курсами
медицинской генетики и неврологии, мануальной терапии и рефлексотерапии¹

¹Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, 400131, пл. Павших Борцов, 1;

²Волгоградский медицинский научный центр, Волгоград, 400131, пл. Павших Борцов, 1

Цель исследования — разработать и провести клиническую апробацию современного пассивного экзоскелета верхних конечностей для абилитации и реабилитации инвалидов с верхним вялым пара(моно)парезом.

Материалы и методы. Проведена поэтапная анатомическая параметризация экзоскелета. Апробированы конструкции экзоскелета, изготовленные из различных материалов. В качестве упругих деталей испытывали различные пружинные элементы и резиновые кольца. На основе полученных данных создана модель пассивного экзоскелета верхней конечности «ЭКЗАР». Апробацию конструкции и адаптацию ее элементов выполняли на 7 больных с синдромом верхнего пара(моно)пареза.

Результаты. При сравнении материалов деталей экзоскелета «ЭКЗАР» отдано предпочтение магниево-алюминиевым сплавам, в качестве упругих элементов конструкции выбраны резиновые кольца. При конструировании и изготовлении экзоскелета был соблюден модульный принцип. При использовании пассивного экзоскелета «ЭКЗАР» отмечены эффект увеличения амплитуды движений в плечевом и локтевом суставах, что является ключевым в действии аппарата, а также эффекты абилитации и реабилитации.

Заключение. Считаю результаты апробации пассивного экзоскелета верхней конечности «ЭКЗАР» положительными, требующими дальнейшей разработки и модернизации.

Ключевые слова: пассивный экзоскелет; парез; анатомическая параметризация экзоскелета; экзоскелет верхних конечностей.

Как цитировать: Vorobyev A.A., Andryushchenko F.A., Ponomareva O.A., Solovyeva I.O., Krivonozhkina P.S. The development and clinical testing of “EXAR”, passive upper limb exoskeleton. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2016; 8(2): 90–97, <http://dx.doi.org/10.17691/stm2016.8.2.13>.

English

The Development and Clinical Testing of “EXAR”, Passive Upper Limb Exoskeleton

A.A. Vorobyev, MD, DSc, Professor, Head of the Department of Operative Surgery and Topographic Anatomy¹;
Head of the Department of Experimental and Clinical Surgery²;

F.A. Andryushchenko, MD, PhD, Senior Researcher, Laboratory of Pathology Modelling²;

O.A. Ponomareva, MD, PhD, Senior Lecturer, Department of Operative Surgery and Topographic Anatomy¹;
Junior Researcher, Laboratory of Pathology Modelling²;

I.O. Solovyeva, 6th-year student, Pediatrics Faculty¹;

P.S. Krivonozhkina, MD, PhD, Assistant, Department of Neurology, Neurosurgery
with Courses in Medical Genetics and Neurology, Manual Therapy and Reflexive Therapy¹

Для контактов: Воробьев Александр Александрович, e-mail: cos@volgmed.ru

¹Volgograd State Medical University, 1 Pavshikh Bortzov Square, Volgograd, 400131, Russian Federation;

²Volgograd Medical Science Center, 1 Pavshikh Bortzov Square, Volgograd, 400131, Russian Federation

The aim of the investigation was to develop and perform a clinical approbation of a modern passive upper-limb exoskeleton for the habilitation and rehabilitation of disabled patients with upper flaccid para(mono)paresis.

Materials and Methods. We performed a phase-by-phase anatomic parametrisation of an exoskeleton. We tested different exoskeleton designs made of different materials. Testing was also carried out on the various spring elements and rubber rings used as elastic elements. On the basis of the findings we created "EXAR", a prototype passive exoskeleton for the upper limb. Testing of the design and the adaptation of its elements was carried out on 7 patients with upper para(mono)paresis syndrome.

Results. On comparing the materials for possible use in the "EXAR" exoskeleton we preferred magnesium-aluminium alloys and the use of rubber rings for its elastic elements. During the design and production of this exoskeleton we observed a modular principle. In use we were able to note that the "EXAR" passive exoskeleton increased the range of movement in the shoulder and elbow joints, this being a key requirement for the device in addition to its effect on habilitation and rehabilitation.

Conclusion. We consider the results of approbation of the "EXAR" passive exoskeleton for the upper limb to be positive, but that they indicate a requirement for further development and modernisation.

Key words: passive exoskeleton; paresis; anatomic parametrisation of an exoskeleton; upper limb exoskeleton.

При анализе литературы мы не обнаружили информации о широком медицинском применении пассивных экзоскелетов верхней конечности в нашей стране и европейском зарубежье. Сведения о подобных аппаратах встречаются в основном в США, однако речь идет чаще всего о военной отрасли [1, 2], хотя востребованность экзоскелетов в практическом здравоохранении не вызывает сомнений.

Роль верхних конечностей в деятельности человека трудно переоценить: без них невозможны ни полноценное освоение мира детьми, ни активная самостоятельная жизнь взрослых. И если для инвалидов с поражением нижних конечностей разработаны средства мобильности (ходунки, коляски, автомобили), то для больных верхним пара(моно)парезом, несмотря на предпринимаемые попытки [3], адекватного системного технического решения пока не представлено.

Цель исследования — разработка и клиническая апробация современного пассивного экзоскелета верхних конечностей для абилитации и реабилитации инвалидов с верхним вялым пара(моно)парезом.

В процессе исследования решались следующие задачи:

сформировать требования к пассивному экзоскелету «ЭКЗАР» и определить его оптимальные технические характеристики;

в ходе апробации оценить и выбрать оптимальные материалы для изготовления конструкции;

разработать методику анатомической параметризации пользования аппаратом;

сформировать показания и противопоказания к пользованию экзоскелетом «ЭКЗАР»;

определить возможности восполнения утраченных функций при пользовании аппаратом.

Материалы и методы

Дизайн исследования. Наши первоначальные по-

пытки выполнить математическое моделирование разрабатываемой конструкции не увенчались успехом и оставлены на перспективу, так как для его выполнения необходимо знание параметров, получить которые в абсолютных цифрах на современном этапе невозможно, — массы верхней конечности и силы мышц.

Изначально мы использовали трудоемкую методику эмпирического подбора вариантов с выявлением обратной зависимости, однако устойчивой работы конструкции достигнуть не удалось, что обусловило необходимость разработки методики поэтапной анатомической параметризации аппарата [4–6].

Анатомическая параметризация — это определение соответствий между различными анатомическими характеристиками строения человеческого тела и параметрами механического устройства, которые обуславливают оптимальную работу образующейся при этом биомеханической системы. Этапы анатомической параметризации [6]:

1-й этап — определение точек анатомической привязки на пациенте;

2-й этап — определение линейных анатомических размеров, необходимых для дальнейшего расчета конструкции;

3-й этап — определение анатомически зависимых параметров аппарата, которые обуславливают его способность восполнять утраченные функции верхней конечности;

4-й этап — определение оптимальных взаимоотношений конструкции с конечностью, необходимых для нормальной работы по замещению утраченных функций (приоритет на патент РФ от 16.03.16, регистрационный номер 2016109511 Федеральной службы РФ по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам).

Разработку требований к пассивному экзоскелету «ЭКЗАР» выполняли посредством анализа биомеха-

ники основных движений верхней конечности здорового человека [7].

При изготовлении конструкции были апробированы следующие материалы: бекелитовая фанера, алюминевые сплавы АМг3, АМг5, АМц и Д16Т, нержавеющая медицинская сталь, PLA- и ABS-пластики, литевой двухкомпонентный пластик JETACAST 70, ортопедические низкотемпературные термопластики с памятью формы «Турбокаст» и «Поливик», полимеры жесткой фиксации, полиэфирные и эпоксидные смолы. Предпочтение отдавалось отечественным материалам.

Испытывали следующие способы изготовления деталей: 3D-моделирование, объемную фрезеровку на станке с числовым программным управлением, 3D-принтер, литье в пресс-формы, лазерную резку.

В качестве упругих деталей оценивали различные пружинные элементы и резиновые кольца.

Апробацию конструкции и адаптацию ее элементов выполняли на 7 больных с синдромом верхнего пара(моно)пареза (табл. 1), выбранных нами из имеющейся базы данных пациентов (59 человек) методом случайной выборки. Исследование проведено в соответствии с Хельсинкской декларацией (принятой в июне 1964 г. (Хельсинки, Финляндия) и пересмотренной в октябре 2000 г. (Эдинбург, Шотландия)). Протокол исследования согласован с Региональным этическим комитетом Волгоградского медицинского научного центра. На каждый случай получали информированное согласие пациентов или их родителей.

Для определения эффективности использования пассивного экзоскелета «ЭКЗАР» применяли сравнение амплитуды активных движений верхних конечностей

без аппарата (исходный уровень, принимаемый нами за контроль) и сразу же после надевания экзоскелета на тело пациента. Ввиду отсутствия методики пользования пассивным экзоскелетом верхних конечностей кратность и продолжительность сеансов определяли индивидуально по принципу субъективного выявления минимальной нагрузки и ее постоянного увеличения с учетом индивидуальной переносимости под контролем врачей ЛФК. Считаем, что широкое применение разработанного экзоскелета в дальнейшем невозможно без детального обоснования методики его использования. Максимальный срок дальнейшего мониторинга показателей активных движений верхней конечности без аппарата составил 1 год.

Показанием к занесению пациентов в базу данных и включению их в исследование являлся синдром верхнего вялого пара(моно)пареза вследствие следующих заболеваний:

- 1) артрогрипоз;
- 2) детский церебральный паралич (атоническостатическая форма и те формы, при которых имеется смешанный тонус мышц конечностей с преобладанием гипотонуса);
- 3) невральная амиотрофия Шарко–Мари–Тута;
- 4) спинальная амиотрофия;
- 5) плечевая плексопатия на фоне: тромбоцитопенической пурпуры Шенляйн–Геноха; травмы и родового повреждения («акушерский паралич»); дополнительных шейных ребер (синдром «верхней апертуры грудной клетки»); в результате неправильного положения верхней конечности во время наркоза при длительном течении операционного периода; на фоне грануле-

Т а б л и ц а 1

Характеристика больных, участвующих в апробации пассивного экзоскелета «ЭКЗАР»

Пациенты	Диагноз	Год рождения	Срок эксплуатации экзоскелета
А.	Артрогрипоз, дистальная форма с верхним периферическим парапарезом (Q74.3)	2010	1 год
Б.	Правосторонняя посттравматическая плечевая плексопатия, глубокий периферический монопарез (S14.3, G55.1)	1998	7 мес
В.	Последствия ишемического инсульта в правой гемисфере в виде левостороннего гемипареза с низким мышечным тонусом (G81.1)	1945	3 мес
Г.	Синдром Персонейджа–Алдрена–Тернера (неврологическая амиотрофия, острый плечелопаточный неврит, идиопатическая плечевая плексопатия верхних пучков), верхний вялый правосторонний монопарез (G54.5)	2008	3 мес
Д.	Миопатия генерализованная неуточненная, верхний вялый парапарез (G72.9)	1991	2 мес
Е.	Муколипидоз IIIa типа, верхний вялый парапарез (E77.0)	2006	1 мес
Ж.	Муколипидоз IIIa типа, верхний вялый парапарез (E77.0)	2008	1 мес

матозной васкулопатии, ассоциированной с вирусом Herpes zoster; экзогенной интоксикации дофамином;

- 6) синдром Гийена–Барре–Штрöля;
- 7) синдром Ларсена;
- 8) синдром Элерса–Данлоса;
- 9) дистрофическая дисплазия;
- 10) врожденная миопатия (синдром «центрального стержня», немалиновая миопатия и другие варианты синдрома «вялого ребенка»);
- 11) миотоническая дистрофия;
- 12) боковой амиотрофический синдром, переднерогичная форма.

Показанием к использованию разработанного аппарата служил симптомокомплекс верхнего вялого парализа, выраженный следующими проявлениями:

снижение силы мышц (сгибателей, разгибателей, пронаторов, супинаторов, отводящих, приводящих) верхних конечностей до 1, 2, 3 баллов, что соответствует умеренной или глубокой степени пареза;

ограничение скорости, объема (амплитуды) движений в проксимальных и дистальных отделах верхних конечностей: ограничение или невозможность сгибания и/или разгибания рук в плечевом и/или локтевом суставах; невозможность поднять руку до уровня плечевого пояса и выше; невозможность отвести руку от туловища; ограничение или невозможность ротации верхней конечности;

снижение мышечного тонуса в проксимальных и дистальных отделах верхних конечностей либо наличие смешанного тонуса с преобладанием гипотонии;

снижение или отсутствие сухожильных рефлексов с рук (сгибательно-локтевой, разгибательно-локтевой, карпорадиальный);

отсутствие контрактур в суставах верхней(их) конечности(ей).

При данном симптомокомплексе происходит анатомо-физиологическое разобщение между центральным и периферическим отделами нервной системы, причем нарушается как прямая, так и обратная связь.

Критериями включения в исследование являлись возраст от 3 лет, нормальный уровень психического развития у детей, отсутствие выраженного когнитивного дефицита у взрослых, наличие верхних вялых (периферических) умеренных/глубоких моно/парапарезов либо верхних смешанных умеренных/глубоких моно/парапарезов с преобладанием гипотонии.

Критериями исключения пациента из исследования и противопоказанием к пользованию аппаратом являлись возраст до 3 лет, задержка психического развития у детей, выраженные когнитивные нарушения у взрослых, наличие спастического гипертонуса мышц верхних конечностей, наличие контрактур в крупных суставах верхних конечностей, онкологические заболевания в инкурабельной стадии.

Результаты

Формирование требований к пассивному экзоскелету верхней конечности. Проведенный нами анализ основных типовых движений верхней конеч-

ности, наиболее часто используемых в повседневной жизни здорового человека, позволил определить набор и амплитуду движений, необходимых для самостоятельного обслуживания и полноценного физического развития инвалида, которые могут быть восполнены с помощью пассивного экзоскелета «ЭКЗАР». На основании этого сформулированы требования, которым должен удовлетворять аппарат:

обладать объемом движений, приближенным к показателям здорового человека;

иметь легкую и прочную конструкцию, адаптируемую к анатомическим параметрам конечности;

фрагменты конструкции должны повторять строение верхней конечности человека;

быть изготовленным из биологически инертных материалов;

иметь возможность замены элементов конструкции по мере роста ребенка;

отличаться доступной ценой для массового потребителя [8];

быть мобильным и непривязанным к источнику питания;

не зависеть от импортных составляющих.

Критериями безопасности, предъявляемыми нами к апробируемому устройству, являлись: отсутствие электрических приводов; ограничение свободы движений в пределах физиологической нормы; отсутствие в конструкции острых углов и режущих кромок; отсутствие дополнительной нагрузки на суставы; выполнение деталей конструкции, контактирующих с телом испытуемого, из материалов, разрешенных к медицинскому применению в РФ.

Техническая характеристика разработанного экзоскелета «ЭКЗАР». Изготовлены и апробированы две базовые версии пассивного экзоскелета — стационарная, с креплением к инвалидному креслу, и мобильная, с креплением к индивидуальному жакету.

Масса экзоскелета «ЭКЗАР» вместе с жакетом для ребенка с парапарезом — 1200–1800 г в зависимости от массы тела ребенка. Для взрослого с парапарезом — 2000–2200 г. У больных с монопарезом масса конструкции меньше. Стационарная версия аппарата легче мобильной, так как в ней отсутствует жакет.

Следует отметить, что масса изделия увеличилась по сравнению с первоначальным вариантом конструкции, изготовленным на 3D-принтере, за счет замены пластика на магниево-алюминиевый сплав и введения в элементы значительного числа подшипниковых узлов. При этом мы выиграли в прочности и долговечности аппарата.

Разработанная версия экзоскелета имеет возможность движения в трех плоскостях — сагиттальной, фронтальной и горизонтальной (промежуточные и оптимальная плоскости). Ротационные движения в аппарате данной конструкции отсутствуют. Сравнительная амплитуда движений представлена в табл. 2.

Из приведенных данных видно, что дефицит движений в аппарате не критичен и позволяет достаточ-

Таблица 2

Сравнительная амплитуда движений человека и аппарата, градусы

Элементы движения	Амплитуда сустава (норма)	Амплитуда шарнира	Дефицит
Плечевой сустав:			
сгибание	180	155	5
разгибание	-60	+20	80
отведение	180	155	25
приведение	0	20	20
Локтевой сустав:			
сгибание	0	5	5
разгибание	0	0	0

но полно воспроизводить движения в его шарнирах в соответствии с нормальными движениями верхней конечности.

Расчет себестоимости экзоскелета «ЭКЗАР» показал, что его можно отнести к экзоскелетам доступной стоимости [8].

При разработке и апробации образцов аппарата «ЭКЗАР» было установлено, что достижение оптимального решения невозможно без реализации следующих условий.

1. При выборе материалов деталей конструкции следует отдавать предпочтение магниево-алюминиевым сплавам как сочетающим в оптимальном соотношении легкость и прочность конструкции, хотя при этом и увеличивается трудоемкость и специфичность их обработки.

2. При изготовлении упругих элементов конструкции целесообразнее использовать резиновые кольца как исключая сложный настроечный узел в случае применения пружин и дающие возможность больному индивидуально подбирать их количество.

3. При определении оптимальных рычагов аппарата основное внимание следует обращать на подбор тяг надплечья и плеча, однако при нарушении ротации предплечья лонгету целесообразно устанавливать индивидуально.

4. Для повышения износоустойчивости узлов трения следует производить замену осей на подшипники (всего 32 на конструкцию).

5. С целью обеспечения возможностей замены деталей аппарата с учетом роста ребенка и износа (деформации) элементов необходимо разделять части экзоскелета на анатомозависимые и анатомонезависимые.

6. При конструировании и изготовлении экзоскелета следует использовать модульный принцип, значительно расширяющий возможности конструкции и предусматривающий необходимую настройку аппарата и использование дополнительных элементов, обеспечивающих включение в работу лучезапястного сустава и ротационную функцию пораженной конечности.

Клиническая апробация. Изучение возможностей экзоскелета «ЭКЗАР» было проведено на 7 больных (см. табл. 1). Процедура представляла собой выполнение лечебно-физкультурного комплекса с аппаратом и без него, а также обычное пользование экзоскелетом в домашних условиях, во время игр, нахождения в детском саду, при выполнении повседневной работы и процедур ухода за собой (прием пищи, расчесывание, умывание, чистка зубов и др.). При использовании пассивного экзоскелета «ЭКЗАР» отмечены следующие положительные эффекты.

1. *Эффект увеличения амплитуды движений в плечевом и локтевых суставах.* Данный эффект является ключевым в действии аппарата. Выявлено, что во всех случаях при пользовании экзоскелетом «ЭКЗАР» происходит значительное увеличение амплитуды движений в локтевых и плечевых суставах. В определенной степени рабочая амплитуда возможных движений в аппарате при отсутствии контрактур в верхних конечностях определяется до надевания аппарата, посредством выявления разницы между остаточными активными и пассивными движениями верхней конечности. Таким образом, при отсутствии мышечной и суставной тугоподвижности можно полностью рассчитывать на увеличение амплитуды движений конечности(ей) до заданной амплитуды движений, которую обеспечивает пассивный экзоскелет.

2. *Эффект абилитации.* Этот эффект связан с увеличением амплитуды движений. Полученные результаты показали, что функциональная значимость верхней(их) конечности(ей) возрастает на порядок. Пользуясь терминологией А.И. Капанджи [7], можно констатировать, что при отсутствии контрактур в конечностях аппарат позволяет полное пользование передним противолатеральным путем движений, частичное пользование передним гомолатеральным путем движений и частичное пользование задним путем движений. Частичное ограничение двух последних путей движений связано с отсутствием возможности вращательных движений в аппарате. При этом без аппарата эти пути задействовать было крайне сложно. Следовательно, у больного появляется возможность выполнения повседневных функций по самостоятельному обслуживанию — гигиена, прием пищи, а также восполнения утраченных навыков — игра на пианино, рисование, танцы с участием рук (рис. 1, 2).

3. *Эффект реабилитации.* Данный вопрос изучен пока недостаточно и является предметом дальнейшего исследования. Для полноценного ответа должен пройти достаточный срок наблюдения (1 год и более). Кроме того, при оценке следует учитывать характер течения заболевания, приведенного к парезу верхних конечностей. Вместе с тем длительный период наблюдения (1 год) за больной с артрогрипозом (пациент А. в табл. 1) внушает некоторый оптимизм. Амплитуда движений верхней конечности данной пациентки при пользовании экзоскелетом «ЭКЗАР» существенно расширилась (табл. 3).



Рис. 1. Максимальная возможность рисования пораженной правой конечностью у пациента Г. (см. табл. 1) без экзоскелета



Рис. 2. Максимальная возможность рисования пораженной правой конечностью у пациента Г. (см. табл. 1) с применением пассивного экзоскелета «ЭКЗАР» (заштрихован оригинальный узел экзоскелета)

Таблица 3

Амплитуда движений в плечевом и локтевом суставах испытуемого пациента при использовании экзоскелета «ЭКЗАР», градусы

Элемент движений	Норма	В исходном состоянии (правая/левая рука без аппарата)		После надевания аппарата (правая/левая рука)	Спустя 7 мес пользования аппаратом (правая/левая рука)
В плечевом суставе (прямой верхней конечности):					
сгибание активное в сагиттальной плоскости	180	85/65		155/155	100/100
сгибание пассивное в сагиттальной плоскости	180	140/110		155/155	155/170
разгибание активное в сагиттальной плоскости	40	50/50		—	50/40
разгибание пассивное в сагиттальной плоскости	60(40)	85/75		—	75/70
отведение активное во фронтальной плоскости	180	85/70		155/155	105/95
отведение пассивное во фронтальной плоскости	180	150/110		155/155	170/165
В локтевом суставе:					
сгибание активное	40	60/60		50/50	40/60
сгибание пассивное	40	30/30		45/0	30/30
разгибание активное	0	(0)180	(0)180	180	180
разгибание пассивное	0	(0)180	(0)180	180	180

Мы считаем, что эффект реабилитации основывается на механизме биологической обратной связи (англ. — biofeedback). Лечение с помощью метода биологической обратной связи доказало свою рациональность при активации адаптивных систем мозга на фоне развития патологических процессов в ЦНС. Учитывая то, что «ядро» клинической картины исследуемых нами заболеваний — вялый парез верхних конечностей, а основным патогенетическим фактором их развития является поражение нервной системы различного генеза, приводящее к нарушению прямой и обратной связи между ее центральными и периферическими отделами, логично включать в лечение механизмы их восстановления. Медикаментозное лечение данных патологий направлено в основном на восстановление прямых отношений между ЦНС и периферией. А восстановление обратной связи между периферической и центральной нервной системами — задача, решаемая преимущественно с помощью физиотерапевтических процедур, массажа, лечебной физкультуры. Экзоскелет, с нашей точки зрения, является идеальным способом восстановления обратной связи. С его помощью осуществляется абсолютно безвредное влияние на классические рефлексогенные рецепторные зоны мышц и сухожилий верхних конечностей, которое восстанавливает деятельность рефлекторных дуг, доставляющих информацию о движениях соответствующим сегментам спинного мозга. В свою очередь спинной мозг по восходящим путям активирует «молчашие» двигательные зоны коры головного мозга. Восстанавливая биологическую обратную связь между периферическим и центральным отделом нервной системы, мы, согласно нейрофизиологическим законам, способствуем улучшению прямого влияния ЦНС на периферическую нервную систему — включаются механизмы саморегуляции. Тем самым осуществляется немедикаментозная коррекция патологического развития нервной системы, увеличиваются объем, скорость и амплитуда движений в верхних конечностях. Неоспоримым фактом является также то, что при наличии полноценных движений в суставах верхней конечности будет снижаться вероятность образования мышечной и суставных контрактур.

4. *Эффект профилактики нарушения осанки.* Данный эффект связан с использованием несущего корсета (жакета), который помимо своей основной функции способствует коррекции нарушения осанки посредством предотвращения гиперлордоза, обусловленного включением в подъем руки дополнительных мышц спины.

Анализ полученных результатов позволяет считать, что разработанный пассивный экзоскелет верхней конечности «ЭКЗАР» полностью соответствует клинико-анатомическим требованиям, позволяет достаточно полно воспроизводить движения в его шарнирах в соответствии с нормальными движениями верхней конечности и обеспечивает абилитацию и реабилитацию пациентов с верхним пара(моно)парезом.

Положительные эффекты от воздействия аппарата можно разделить на две группы: ранние, связанные с непосредственной возможностью аппарата расширять амплитуду движений верхней конечности в момент пользования им; отсроченные, связанные с тренировкой мышц и ликвидацией последствий мышечной и суставной контрактуры, а также с профилактикой гиперлордоза.

Заключение. Считаем первый опыт использования пассивного экзоскелета верхней конечности «ЭКЗАР» положительным. Основными направлениями дальнейших опытно-конструкторских разработок на настоящий момент являются поиск и внедрение новых конструктивных решений для расширения ареала возможных движений аппарата до нормальных величин движения верхней конечности в плечевом и локтевом суставах и определение возможности компенсации нарушенной функции кисти посредством включения движения в лучезапястном суставе.

Финансирование исследования. Работа выполнена за счет внебюджетных средств Волгоградского государственного медицинского университета.

Конфликт интересов. У авторов нет конфликта интересов.

Литература/References

1. Vorobyev A.A., Petrukhin A.V., Zasypkina O.A., Krivonozhkina P.S., Pozdnyakov A.M. Exoskeleton as a new means in habilitation and rehabilitation of invalids (review). *Sovremennyye tekhnologii v medicine* 2015; 7(2): 185–197, <http://dx.doi.org/10.17691/stm2015.7.2.22>.
2. Экзоскелет. Википедия. *Ekzoskelet* [Exoskeleton]. Wikipediya. URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=75908091>.
3. Rahman T., Sample W., Jayakumar S., King M.M., Wee J.Y., Seliktar R., Alexander M., Scavina M., Clark A. Passive exoskeletons for assisting limb movement. *J Rehabil Res Dev* 2006; 43(5): 583–590, <http://dx.doi.org/10.1682/JRRD.2005.04.0070>.
4. Воробьев А.А., Андрищенко Ф.А., Засыпкина О.А., Кривоножкина П.С. К методике определения анатомически зависимых параметров экзоскелета верхней конечности ЭКЗАР. *Волгоградский научно-медицинский журнал* 2015; 1: 58–61. Vorobev A.A., Andruschenko F.A., Zasypkina O.A., Krivonozhkina P.S. Methods of determining anatomically dependent parameters of the EXAR upper extremity exoskeleton. *Volgogradskiy nauchno-meditsinskiy zhurnal* 2015; 1: 58–61.
5. Воробьев А.А., Андрищенко Ф.А., Засыпкина О.А., Кривоножкина П.С. Особенности анатомической параметризации пассивного экзоскелета верхней конечности «ЭКЗАР». *Оренбургский медицинский вестник* 2015; 3(4, 12): 9–12. Vorobev A.A., Andruwenko F.A., Zasypkina O.A., Krivonozhkina P.S. Features of anatomical parametrization of passive exoskeleton of upper extremity "EXAR". *Orenburgskiy meditsinskiy vestnik* 2015; 3(4–12): 9–12.
6. Воробьев А.А., Андрищенко Ф.А., Засыпкина О.А., Кривоножкина П.С. Этапы анатомической параметризации экзоскелета верхней конечности «ЭКЗАР». *Журнал анатомии и гистопатологии* 2015; 4(2): 27–30. Vorob'yev A.A., Andryushchenko F.A., Zasypkina O.A., Krivonozhkina P.S.

Development of anatomical parameters of the upper limb exoskeleton "EXAR". *Zhurnal anatomii i gistopatologii* 2015; 4(2): 27–30.

7. Капанджи А.И. Верхняя конечность. Физиология суставов. М: Эксмо; 2014; 368 с. Kapandzhi A.I. *Verkhnyaya konechnost'. Fiziologiya sustavov* [The upper limb. The physiology of the joints]. Moscow: Eksmo; 2014; 368 p.

8. Воробьев А.А., Андрищенко Ф.А., Соловьева И.О.,

Засыпкина О.А., Кривоножкина П.С., Поздняков А.М. Терминология и классификация экзоскелетов. Вестник Волгоградского государственного медицинского университета 2015; 3(55): 71–78. Vorobiev A.A., Andrutshenko F.A., Zasypkina O.A., Solovieva I.O., Krivonozhkina P.S., Pozdnykov A.M. Terminology and classification of exoskeleton. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta* 2015; 3(55): 71–78.