

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ПАССИВНОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ У ДЕТЕЙ С ДЦП

Л.Н. Петрова¹, А.В. Шевцов², А.А. Петров¹, Д.Х. Яхин¹

¹Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

²Национальный государственный университет физической культуры, спорта и здоровья имени П.Ф. Лесгафта, г. Санкт-Петербург, Россия

Цель исследования. Провести комплексную терапию с помощью различных средств реабилитации, которые позволят откорректировать имеющуюся двигательную дисфункцию. **Организация и методы исследования.** Исследования проводились в центре спортивной науки Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск, с сентября 2019 года по декабрь 2019 года. Всего в исследовании приняли участие с их добровольного согласия 15 детей в возрасте от 4 до 8 лет. Для определения объема движения в суставах нижних конечностей был использован роботизированный комплекс BioDex. Были получены ротационные углы коленного (α_k), тазобедренного (α_t) и голеностопного сустава (α_r). Для разработки 3D-модели изделия был применен программный продукт SolidWorks. **Результаты.** Были получены и статистически обработаны антропометрические данные здоровых людей в возрасте от 4 до 8 лет. С использованием этих данных были рассчитаны основные линейные и пространственные параметры элементов проектируемого устройства. Далее было выполнено компьютерное моделирование экзоскелета в автоматизированной системе проектирования SolidWorks с возможностью изменения основных параметров устройства в соответствии с антропометрическими данными конкретного пациента. **Заключение.** Была разработана 3D-модель пассивного экзоскелета. Нами был изготовлен макетный образец экзоскелета с использованием аддитивных технологий для проведения дальнейшей апробации. По итогам этого мероприятия при необходимости будет выполнена корректировка 3D-модели экзоскелета и начат эксперимент по применению данного устройства для реабилитации пациентов с ДЦП.

Ключевые слова: ДЦП, экзоскелет, реабилитация.

Введение. Детский церебральный паралич (ДЦП) является одной из опаснейших патологий современности. Болезнь характеризуется поражением нервной системы, что приводит к нарушениям в работе опорно-двигательного аппарата. Поражается структура головного мозга, в том числе ствол, кора и капсульные образования, что вызывает тяжелые осложнения, предполагающие продолжительный лечебный процесс и реабилитацию [4]. Ежегодно такой диагноз ставят 16 тысячам новорожденных в стране [2].

Цель исследования: провести комплексную терапию с помощью различных средств реабилитации, которые позволят откорректировать имеющуюся двигательную дисфункцию.

Материалы и методы. Доминирующей ортопедической патологией у детей с ДЦП является поражение нижних конечностей, а именно дисплазия тазобедренного сустава и деформация стопы [6].

Для пациентов, страдающих ДЦП, большое значение имеет адаптация к жизни в об-

ществе, развитие навыков, социализация. Реабилитация для детей с ДЦП в первую очередь подразумевает устранение дефекта двигательной деятельности [12].

Физические упражнения являются основой реабилитации детей с двигательными нарушениями в комплексной терапии. Упражнения направлены: на увеличение объема движений; улучшение моторных функций; на предотвращение неправильных поз; уменьшение влияния патологических рефлексов за счет активации установочных рефлексов и правильного положения тела с фиксацией конечностей [10]. Также за счет упражнений у ребенка увеличивается выносливость, укрепляется мышечный корсет, улучшается жизненный тонус, увеличивается подвижность суставов [13]. Это приводит к возникновению обратной связи в центральную нервную систему (ЦНС), в связи с чем мозг получает правильные сигналы «тело – голова – тело», что приводит к улучшению в двигательном развитии детей с ДЦП [9].

В России и европейских странах применяют систему классификации глобальных моторных функций (GMFCS) для определения степени тяжести поражения моторных функций [5].

Физические методы лечения больному ДЦП подбирают в зависимости от его возраста, ведущего патологического симптома в двигательной сфере, степени двигательных нарушений (уровень по GMFCS), наличия осложнений основного патологического состояния (например, эпилептических приступов или вторичных скелетных деформаций) и наличия сопутствующих заболеваний (например, врожденного порока сердца или гемофилии) [11].

Для изменения положения тела пациента с выраженными парезами применяют специальное оборудование: вертикализаторы, тренажеры, экзоскелеты и т. п., позволяющие отрабатывать координацию и шаговые движения [7].

В настоящий момент применяются различные комплексы:

- лечебные костюмы типа «Регент» (разработчик ООО «Центр авиакосмической медицины и технологий», г. Москва [1]), «Адели» (разработчик ООО «АЮРВЕДА», г. Москва [1]), которые представляют собой силовую систему, состоящую из опорных элементов и эластичных регулируемых тяг, с помощью которой с лечебной целью создается нагрузка на опорно-двигательный аппарат больного;

- медицинские экзоскелеты ExoAtlet (разработчик ООО «ЭкзоАтлет», г. Москва), EksoGT™ (разработчик EksoBionics, USA), ExoLite (разработчик Юго-Западный государственный университет, г. Курск), которые предназначены для реабилитации пациентов с локомоторными нарушениями нижних конечностей, наступившими в результате травм, заболеваний опорно-двигательного аппарата или нервной системы;

- роботизированный комплекс Lokomat (разработчик Hocoma, Швейцария) и др.

Потенциальными пациентами, для которых разрабатывался макетный образец пассивного экзоскелета, стали дети в возрасте от 4 лет, имеющие I и II уровень моторных функций по шкале GMFCS. Они уже научились самостоятельно ходить, но в силу особенностей заболевания имеют некоторые отклонения от шаговых движений человека, неотягощенного заболеванием ДЦП.

Пациенты с диагнозом ДЦП, как правило, имеют перекос таза, сопровождающий односторонний подвывих или вывих бедра [3], а также деформацию стопы. Поэтому в первую очередь задача пассивного экзоскелета заключалась в фиксации костей таза и стопы в положении, близком к «нормальному», и далее уже из этого положения создание возможности отрабатывать паттерны ходьбы [8].

Прежде чем начать процесс разработки 3D-модели экзоскелета, были получены основные антропометрические показатели 15 здоровых детей в возрасте от 4 до 8 лет (табл. 1).

Таблица 1
Table 1
Антропометрические данные группы детей
возраста от 4 до 8 лет
Anthropometric data of children
aged from 4 to 8 years

Рост, см Body height, cm	116,3 ± 11,7
Ширина таза (h _T), см Width of pelvis (h _T), cm	27,3 ± 6,2
Длина от тазобедренного сустава до колена (h _{TC}), см Pelvis joint – knee distance (h _{TC}), cm	32,4 ± 8,7
Длина от колена до пола (h _{Гс}), см Knee to ground distance (h _{Гс}), cm	43,1 ± 9,5
Длина стопы (h _с), см Foot length(h _с), cm	21,3 ± 2,4
Обхват бедра, см Hip circumference, cm	40,7 ± 7,4
Обхват икроножной мышцы, см Gastrocnemius circumference, cm	28,6 ± 4,7
Обхват по голеностопу, см Ankle circumference, cm	18,4 ± 3,5

В результате были определены диапазоны изменения основных линейных параметров (h_T, h_{TC}, h_{Гс}, h_с), которые позволят настроить экзоскелет индивидуально для каждого пациента.

При ходьбе человек совершает вращательные движения в тазобедренном и коленном суставе, поэтому для расчета конструкции необходимо знать углы поворота в суставах. С использованием роботизированного комплекса BioDex, размещенного в Научно-исследовательском центре спортивной науки ЮУрГУ, были получены ротационные углы коленного (α_к), тазобедренного (α_T) и голеностопного сустава (α_Г) (табл. 2).

Таблица 2
Table 2

Объем движения в суставах нижних конечностей у пациентов исследуемой группы
The range of motion in the lower extremities in participants

Объем движения в тазобедренном суставе, град. The range of motion in the pelvis joint, degrees	85 ± 8,7
Объем движения в коленном суставе, град. The range of motion in the knee joint, degrees	73 ± 6,8
Объем движения в голеностопном суставе в фронтальной плоскости, град. The range of motion in the ankle joint in the frontal plane, degrees	10 ± 3,2
Объем движения в голеностопном суставе в сагиттальной плоскости, град. The range of motion in the ankle joint in the sagittal plane, degrees	3 ± 1,2

Результаты исследования. Используя полученные статистические данные параметров нижних конечностей здорового человека, в среде автоматизированного проектирования SolidWorks была построена 3D-модель пассивного экзоскелета (рис. 1), состоящего из:

- устройства для позиционирования таза и бедер с фиксацией к телу эластичными ремнями (на рис. 1 не показаны);
- устройства для позиционирования голени и стопы;
- одностепенные шарниры «таз – бедро» и «бедро – колено».



Рис. 1. 3D-модель пассивного экзоскелета нижних конечностей
Fig. 1. A 3D model of the exoskeleton

Устройства для позиционирования таза и бедер имеют возможность регулировки в зависимости от параметров $h_{гс}$ и $h_{гк}$.

На базе МБОУ «Школа-интернат № 4» г. Челябинска начат эксперимент по апробации данного устройства. Набрана группа из 9 детей возраста 4–8 лет, которые нуждаются в реабилитации. Было проведено тестирование с использованием роботизированного комплекса BioDex для определения объема движения в суставах (рис. 2).



Рис. 2. Определение объема движения в суставах на аппарате BioDex
Fig. 2. Determining the range of motion in the joints with the BioDex robotic equipment

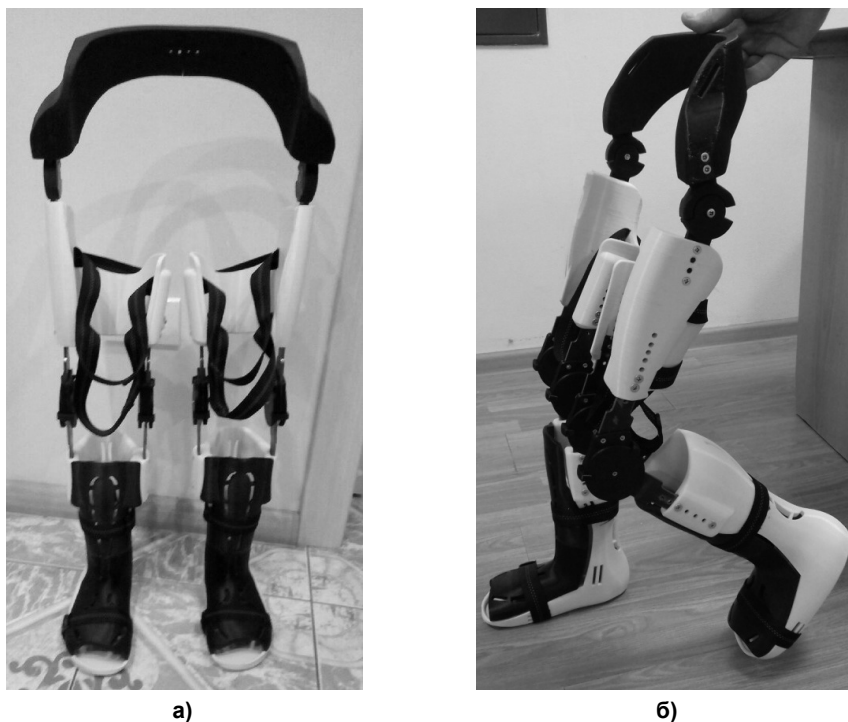


Рис. 3. Макетный образец пассивного экзоскелета нижних конечностей
Fig. 3. A prototype of a passive exoskeleton for the lower extremities

Заключение. Детский церебральный паралич (ДЦП) является одной из опаснейших патологий современности. Болезнь характеризуется поражением нервной системы, что приводит к нарушениям в работе опорно-двигательного аппарата. Данные пациенты нуждаются в проведении комплексной терапии с помощью различных средств реабилитации, которые позволят откорректировать имеющуюся двигательную дисфункцию. В ходе данного исследования были получены и статистически обработаны антропометрические данные здоровых людей в возрасте от 4 до 8 лет. С использованием этих данных были рассчитаны основные линейные и пространственные параметры элементов проектируемого устройства. Было выполнено компьютерное моделирование экзоскелета в автоматизированной системе проектирования SolidWorks с возможностью изменения основных параметров устройства в соответствии с антропометрическими данными конкретного пациента. Был изготовлен макетный образец экзоскелета (рис. 3) с использованием технологии 3D-печати для проведения дальнейшей апробации. На базе МБОУ «Школа-интернат № 4» г. Челябинска набрана группа из 9 детей в возрасте 4–8 лет, которые нуждаются в реабилитации, и начата апробация

данного устройства. Начат трехмесячный эксперимент по коррекции ходьбы у пациентов. Было проведено тестирование устройства на удобство ношения. Выявлена необходимость использования смягчающих прокладок.

Литература

1. Деревцова, С.Н. Использование лечебных костюмов в реабилитации больных разных соматиков с синдромом центрального гемипареза / С.Н. Деревцова, В.Г. Николаев, С.В. Прокопенко // Кубанский науч. мед. вестник. – 2011. – № 4. – С. 52-60.
2. *Здравоохранение в России.* – 2018. – С. 60.
3. Остеотомия таза при нестабильном подвывихе и вывихе бедра у больных детским церебральным параличом / Н.М. Белокрылов, Н.В. Полякова, Н.А. Пекк и др. // Детская хирургия. – 2013. – № 4. – С. 16–19.
4. Рогов, А.В. Реабилитация больных детским церебральным параличом с применением тренажеров / А.В. Рогов // Саратовский науч.-мед. журнал. – 2013. – Т. 9, № 4. – С. 687–691.
5. Ситникова, Е.П. Влияние уровня двигательных возможностей на развитие нутритивных нарушений у детей с ДЦП / Е.П. Ситникова, И.А. Леонтьев, Н.Г. Сафоно-

ва // *Международ. науч.-исследоват. журнал.* – 2016. – № 6. – С. 69–71.

6. *Фадеева, Ю.В. Характер ортопедической патологии у детей и подростков с различным поражением нервной системы / Ю.В. Фадеева, А.Б. Яворский, Е.Г. Сологубов // Вестник РГМУ.* – 2010. – № 2. – С. 35–40.

7. *Hand Orientation for Grasping and Arm Joint Rotation Patterns in Healthy Subjects and Hemiparetic Stroke Patients / A. Roby-Brami, S. Jacobs, N. Bennis, M.F. Levin // Brain Res.* – 2003. – Vol. 969. – P. 217–229. DOI: 10.1016/S0006-8993(03)02334-5

8. *Motor Impairment Factors Related to Brain Injury Timing in Early Hemiparesis. Part I: Expression of Upper-Extremity Weakness / T. Sukal-Moulton, K.J. Krosschell, D.J. Gaebler-Spira, J.P. Dewald // Neurorehabil Neural Repair.* – 2014. – Vol. 28. – P. 13–23. DOI: 10.1177/1545968313500564

9. *Muscle Releases to Improve Passive Motion and Relieve Pain in Patients with Spastic Hemiplegia and Elbow Flexion Contractures / S. Namdari, J. Horneff, K. Baldwin, M.J. Keenan //*

Shoulder Elbow Surg. – 2012. – Vol. 21. – P. 1357–1362. DOI: 10.1016/j.jse.2011.09.029

10. *Petrov, A.A. Results of application of mechatronic device in the training process of 11–15-year-old ski racers / A.A. Petrov, V.V. Epishchev, L.N. Petrova // Gazzetta Medica Italiana Archivio per le Scienze Mediche.* – 2018. – Vol. 177. – P. 16–22.

11. *Three Dimensional, Task-Specific Robot Therapy of the Arm after Stroke: a Multicentre, Parallel-Group Randomised Trial / V. Klamroth-Marganska, J. Blanco, K. Campen et al. // Lancet Neurol.* – 2014. – Vol. 13. – P. 159–166. DOI: 10.1016/S1474-4422(13)70305-3

12. *Timing of Initiation of Rehabilitation after Stroke / G. DeJong, J. Smout, D. Horn et al. // Arch. Phys. Med. Rehabil.* – 2015. – Vol. 86. – P. 34–40.

13. *Zhang, L.Q. Developing an Intelligent Robotic Arm for Stroke Rehabilitation / L.Q. Zhang, H.S. Park, Y. Ren // IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2007, pp. 984–993. DOI: 10.1109/ICORR.2007.4428543*

Петрова Лина Николаевна, младший научный сотрудник центра спортивной науки, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76. E-mail: ooo_astra_74@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0545-7635.

Шевцов Анатолий Владимирович, доктор биологических наук, доцент, заведующий кафедрой физической реабилитации, Национальный государственный университет физической культуры, спорта и здоровья имени П.Ф. Лесгафта. 190121, г. Санкт-Петербург, ул. Декабристов, 35. E-mail: sportmedi@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9878-3378.

Петров Алексей Александрович, младший научный сотрудник центра спортивной науки, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76. E-mail: alex_petrov_2@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5072-2587.

Яхин Дмитрий Хадидурович, аспирант кафедры теории и методики физической культуры и спорта, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76. E-mail: yahin1@rambler.ru, ORCID: 0000-0001-6595-4735.

Поступила в редакцию 30 октября 2019 г.

THE DEVELOPMENT OF A PASSIVE EXOSKELETON FOR REHABILITATION OF THE LOWER EXTREMITIES IN CHILDREN WITH CEREBRAL PALSY

L.N. Petrova¹, ooo_astra_74@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0545-7635,

A.V. Shevtsov², sportmedi@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9878-3378,

A.A. Petrov¹, alex_petrov_2@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5072-2587,

D.Kh. Yakhin¹, yahin1@rambler.ru, ORCID: 0000-0001-6595-4735

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

²National State University of Physical Culture, Sports and Health named after P.F. Lesgaft, St. Petersburg, Russian Federation

Aim. The purpose of the article is to conduct a comprehensive therapy using various means of rehabilitation, which will allow to correct the existing motor dysfunction. **Materials and methods.** The research was conducted at the Research Center for Sports Science (Institute of Sport, Tourism and Service, South Ural State University, Chelyabinsk) from September 2019 to December 2019. In total, 15 children aged from 4 to 8 years participated in the study after providing their voluntary consent. To determine the range of motion in the joints of the lower extremities, the BioDex robotic equipment was used. Rotational angles of the knee (α_k), hip (α_r), and ankle joint (α_f) were obtained. SolidWorks software was used to develop a 3D model of the product. **Results.** Anthropometric data of healthy people aged from 4 to 8 years were obtained and statistically processed. Using this data, the basic linear and spatial parameters of the elements of the designed device were calculated. Computer simulation of the exoskeleton was performed in the SolidWorks computer-aided design system with the ability to change the basic parameters of the device in accordance with the anthropometric data of a particular patient. **Conclusion.** A prototype exoskeleton was made using 3D printing technology for further testing. If necessary, a 3D model of the exoskeleton will be adjusted to test this device in practice for the rehabilitation of patients with cerebral palsy.

Keywords: cerebral palsy, exoskeleton, rehabilitation.

References

1. Derevtsova S.N., Nikolayev V.G., Prokopenko S.V. [The Use of Medical Suits in the Rehabilitation of Patients of Different Somatotypes with Central Hemiparesis Syndrome]. *Kubanskiy nauchnyy meditsinskiy vestnik* [Kuban Scientific Medical Bulletin], 2011, no. 4, pp. 52–60. (in Russ.)
2. *Zdravookhraneniye v Rossii* [Health Care in Russia]. 2018, 60 p.
3. Belokrylov N.M., Polyakova N.V., Pekk N.A. et al. [Pelvic Osteotomy with Unstable Subluxation and Dislocation of the Hip in Patients with Cerebral Palsy]. *Detskaya khirurgiya* [Pediatric Surgery], 2013, no. 4, pp. 16–19. (in Russ.)
4. Rogov A.V. [Rehabilitation of Patients with Cerebral Palsy Using Simulators]. *Saratovskiy nauchno-meditsinskiy zhurnal* [Saratov Journal of Medical Scientific Research], 2013, vol. 9, no. 4, pp. 687–691. (in Russ.)
5. Sitnikova E.P., Leont'yev I.A., Safonova N.G. [The Influence of the Level of Motor Capabilities on the Development of Nutritional Disorders in Children with Cerebral Palsy]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2016, no. 6, pp. 69–71. (in Russ.)
6. Fadeyeva Yu.V., Yavorskiy A.B., Sologubov E.G. [The Nature of Orthopedic Pathology in Children and Adolescents with Various Lesions of the Nervous System]. *Vestnik RGMU* [Bulletin of the RSMU], 2010, no. 2, pp. 35–44. (in Russ.)
7. Roby-Brami A., Jacobs S., Bennis N. et al. Hand Orientation for Grasping and Arm Joint Rotation Patterns in Healthy Subjects and Hemiparetic Stroke Patients. *Brain Res*, 2003, vol. 969, pp. 217–229. DOI: 10.1016/S0006-8993(03)02334-5

8. Sukal-Moulton T., Krossschell K.J., Gaebler-Spira D.J. Motor Impairment Factors Related to Brain Injury Timing in Early Hemiparesis. Part I: Expression of Upper-Extremity Weakness. *Neurorehabil Neural Repair*, 2014, vol. 28, pp. 13–23. DOI: 10.1177/1545968313500564
9. Namdari S., Horneff J., Baldwin K. Muscle Releases to Improve Passive Motion and Relieve Pain in Patients with Spastic Hemiplegia and Elbow Flexion Contractures. *Shoulder Elbow Surg*, 2012, vol. 21, pp. 1357–1362. DOI: 10.1016/j.jse.2011.09.029
10. Petrov A.A., Epishev V.V., Petrova L.N. Results of Application of Mechatronic Device in the Training Process of 11-15-Year-Old Ski Racers. *Gazzetta Medica Italiana Archivio per le Scienze Mediche*, 2018, vol. 177, pp. 16–22.
11. Klamroth-Marganska V., Blanco J., Campen K. et al. Three Dimensional, Task-Specific Robot Therapy of the Arm After Stroke: a Multicentre, Parallel-Group Randomised Trial. *Lancet Neurol*, 2014, vol. 13, pp. 159–166. DOI: 10.1016/S1474-4422(13)70305-3
12. DeJong G., Smout J., Horn D. et al. Timing of Initiation of Rehabilitation after Stroke. *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 2015, vol. 86, pp. 34–40. DOI: 10.1016/j.apmr.2005.08.119
13. Zhang L.Q., Park H.S., Ren Y. Developing an Intelligent Robotic Arm for Stroke Rehabilitation. *IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, 2007, pp. 984–993. DOI: 10.1109/ICORR.2007.4428543

Received 30 October 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Опыт разработки пассивного экзоскелета для реабилитации нижних конечностей у детей с ДЦП / Л.Н. Петрова, А.В. Шевцов, А.А. Петров, Д.Х. Яхин // Человек. Спорт. Медицина. – 2019. – Т. 19, № S2. – С. 103–109. DOI: 10.14529/hsm19s214

FOR CITATION

Petrova L.N., Shevtsov A.V., Petrov A.A., Yakhin D.Kh. The Development of a Passive Exoskeleton for Rehabilitation of the Lower Extremities in Children with Cerebral Palsy. *Human. Sport. Medicine*, 2019, vol. 19, no. S2, pp. 103–109. (in Russ.) DOI: 10.14529/hsm19s214
