

А.А. Воробьев<sup>1</sup>, А.А. Никулин<sup>2</sup>, Ф.А. Андрищенко<sup>3</sup>, А.В. Байтингер<sup>2</sup>

## ЭКЗОСКЕЛЕТ ДЛЯ МИКРОХИРУРГА

А.А. Vorobiyov, А.А. Nikulin, F.A. Andryushchenko, A.V. Baytinger

## THE EXOSKELETON FOR A MICROSURGEON

<sup>1</sup> ГБОУ ВПО «Волгоградский государственный медицинский университет» Минздрава РФ, г. Волгоград<sup>2</sup> АНО «НИИ микрохирургии», г. Томск<sup>3</sup> Волгоградский научный медицинский центр, г. Волгоград

Цель исследования: определение клинично-анатомических требований к пассивному экзоскелету верхней конечности для облегчения работы микрохирурга на этапе выполнения микрососудистого и микронейрального шва при работе в «неудобных» для хирурга областях: области шеи, живота и таза, когда нет крайне необходимой горизонтальной опоры предплечий, т.е. работа навесу.

На основе анализа типовых движений верхних конечностей при выполнении хирургических манипуляций были разработаны следующие клинично-анатомические требования к экзоскелету микрохирурга: обладать объемом движений, приближенным к показателям здорового человека, фрагменты экзоскелета должны повторять анатомию верхней конечности, поддерживать конечность в нужном положении без применения усилий и без ограничений движений кисти, иметь мобильную версию, размещенную на несущем жакете, и стационарную, размещенную на рабочем месте микрохирурга, иметь возможность стерилизации, быть независимым от источников питания, быть доступным по цене.

Имеющийся опыт разработки и внедрения пассивного экзоскелета верхних конечностей («ЭКЗАР») для больных с верхним вялым пара-(моно-)парезом при введении дополнительных опций может быть преобразован в экзоскелет для микрохирурга.

**Ключевые слова:** пассивный экзоскелет, микрохирургия, парез, физиологический тремор кисти.

The aim of the study was to assess clinical-anatomic requirements to passive exoskeleton of the upper limb aimed at the simplification of a surgeon work during performing microvascular and microneural sutures while working in “uncomfortable” for the surgeon regions: neck, abdomen and pelvis, when there is no necessary horizontal support for the forearms.

Based upon the analysis of standard movements of upper limbs while performing surgical manipulations, a number of clinical-anatomic requirements to microsurgeon’s exoskeleton were developed: to have an amount of movements which are close to a healthy man movements, exoskeleton fragments have to repeat the upper limb anatomy, to support the limb in the needed position without using any efforts and without restriction of hand movements, to have mobile version, which is placed on supporting “jacket” and a stationary one which is placed on the working place of a microsurgeon, to have a possibility of sterilization, to be independent on power supply, to be of affordable price.

The available experience of the development and introduction of upper limb passive exoskeleton (“EXAR”) for patients having upper flaccid para(mono) paresis can be transformed into the exoskeleton for a microsurgeon while establishing additional options.

**Key words:** passive exoskeleton, microsurgery, paresis, physiological hand tremor

УДК 57.086.86:[611.7:621.73.077]

doi 10.17223/1814147/59/08

## ВВЕДЕНИЕ

Современная разработка экзоскелетов верхней конечности осуществляется преимущественно для военных, промышленных нужд и медицинских целей. В медицине экзоскелеты верхних конечностей используются для абилитации и реабилитации больных с верхним вялым парезом [7, 11].

В последнее время особой актуальностью пользуется разработка и внедрение микрохирур-

гических технологий, позволяющих детально сопоставлять ткани при выполнении микрососудистого и микронейрального швов [1, 2]. Большой проблемой современной микрохирургии является физиологический тремор рук, который может наблюдаться при работе под оптикой на мелких структурах навесу, т.е. в отсутствие необходимой опоры обеих предплечий. Физиологический тремор кистей возможен в связи с усталостью – при большой продолжительности микрохирургических операций и длительном

статическом напряжении, снижающем прецизионность манипуляций, что в конечном итоге отрицательным образом влияет на качество исполнения микрохирургического этапа операций.

Для уменьшения тремора кисти в микрохирургии применяют специальные кресла для микрохирургических операций, с упорами для локтей и предплечий (рис. 1). При их использовании хирурги во многом снижают статическую нагрузку на локти и предплечья при операциях, например, на конечностях пациентов.



Рис. 1. Кресло для микрохирурга

При удаленности оперируемой области от рук хирурга (голова, шея, грудная стенка, передняя брюшная стенка и брюшная полость), т.е. в условиях малого операционного поля приходится оперировать стоя, не имея опоры для верхних конечностей (навесу). Известно, что при оперировании стоя (травматологи-ортопеды) роль тазового пояса в стабилизации функции верхних конечностей и профилактике «активного» тремора рук ничтожна. Подтверждение тому – хорошие результаты работы парализованного американского травматолога-ортопеда Теда Раммела (нижний парапарез), оперирующего на крупных суставах конечностей пациентов (суставы стопы, коленные, голеностопные, локтевые) в специальной модернизированной инвалидной коляске, которая держит его туловище в вертикальном положении (рис. 2). Лет 30–40 назад, на этапе становления microsurgical хирургии, предпринимались попытки профилактить тремор рук при отсутствии опоры для верхних конечностей хирурга медикаментозными средствами (индерал), которые не решили

проблемы физиологического тремора кистей при работе стоя. В 2012 г. были предприняты первые попытки борьбы с физиологическим тремором рук у микрохирургов-офтальмологов с помощью так называемых противотреморных устройств [9]. При этом авторы не приводят информации об использовании этого устройства реконструктивными микрохирургами, что наводит на мысль о том, что данная разработка пока не внедрена в практику microsurgical и микронейральной микрохирургии.



Рис. 2. Тед Раммел, американский травматолог-ортопед, оперирующий в специальной модернизированной инвалидной коляске

Нет сомнений, что дальнейшее развитие microsurgical технологий, включая и супермикрохирургию (диаметр сшиваемых структур менее 500 мкм), напрямую зависит не только от анатомической обоснованности оперативных вмешательств, но и от технической оснащенности оперирующих хирургов (инструментарий, микроскопы, шовный материал и другие средства обеспечения операций). Кроме того, логичным было бы иметь приспособление, снижающее статическую нагрузку на верхние конеч-

ности и облегчающее труд микрохирургов. Разработанная нами классификация предусматривает использование экзоскелетов, облегчающих труд хирургов [6]. По своей сути таковым является хирургический комплекс «Да Винчи». Самым лучшим и, к сожалению, пока очень дорогостоящим решением проблемы тремора рук у микрохирургов, выполняющих прецизионные хирургические вмешательства на анатомических структурах очень малого калибра (лимфатические сосуды – до 300 мкм, артериальные и венозные сосуды – менее 500 мкм), является использование роботов-посредников для робот-ассистируемой микрохирургии [10]. Однако в настоящее время самым доступным (по части финансовых расходов) могут быть экзоскелеты верхних конечностей.

В доступной нам литературе по использованию экзоскелетов в медицине [7] мы не нашли аналогичных устройств для облегчения работы микрохирургов, поэтому сочли необходимым сформулировать требования, предъявляемые к экзоскелетам микрохирурга, исходя из строения здоровых верхних конечностей и их функций при имитации микрохирургических вмешательств.

Цель исследования: определить клинико-анатомические требования к пассивному экзоскелету верхней конечности для использования

его для нужд микрохирургии как средства, обеспечивающего стабильность и точность выполнения микрохирургических манипуляций, снимающего статическое напряжение с рук хирурга и облегчающего его труд при выполнении длительных микрохирургических операций.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В основу работы положен анализ материала по типичным активным движениям верхней конечности микрохирурга при выполнении им микрохирургических операций, с использованием видеосюжетов различных этапов оперативных вмешательств и фундаментальных источников литературы по биомеханике движений верхних конечностей [8].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Основными суставами рук являются плечевой, локтевой и лучезапястный, пястно-фаланговые и межфаланговые сочленения, позволяющие осуществлять базовые движения при выполнении хирургических манипуляций. Результаты анализа характера движений и их необходимой амплитуды при выполнении оперативных вмешательств представлены в таблице.

Анализ характера движений в суставах верхних конечностей и их необходимой амплитуды при выполнении операций

| Типовая хирургическая манипуляция                | Характер допустимой амплитуды активных движений (максимально используемый сектор активных движений), град. |   |   |  |
|--|--|---|---|--|
|  | в плечевом суставе   | в локтевом суставе  | в лучезапястном суставе   | в пястно-фаланговых и сочленениях                                    |
| Разрез   | Сгибание – 15<br>Разгибание – 15<br>Осевая ротация – 15  | Сгибание – 90 ± 15<br>Разгибание – 0<br>Ротация:<br>осевая супинация – 90<br>осевая пронация – 85<br>конусная ротация – 150 | Отведение – 10<br>Приведение – 30<br>Сгибание – 40<br>Разгибание – 40 | Отведение – 10<br>Приведение – 10<br>Сгибание – 50<br>Разгибание – 0 |
| Манипулирование с целью достижения цели операции | Сгибание – 15<br>Разгибание – 15<br>Осевая ротация – 15  | Сгибание – 90 ± 15<br>Разгибание – 0<br>Ротация:<br>осевая супинация – 90<br>осевая пронация – 85<br>конусная ротация – 150 | Отведение – 10<br>Приведение – 30<br>Сгибание – 40<br>Разгибание – 40 | Отведение – 10<br>Приведение – 10<br>Сгибание – 50<br>Разгибание – 0 |
| Соединение тканей                                | Сгибание – 15<br>Разгибание – 15<br>Осевая ротация – 15  | Сгибание – 90 ± 15<br>Разгибание – 0<br>Ротация:<br>Осевая супинация – 90<br>Осевая пронация – 85<br>конусная ротация – 150 | Отведение – 10<br>Приведение – 30<br>Сгибание – 40<br>Разгибание – 40 | Отведение – 10<br>Приведение – 10<br>Сгибание – 50<br>Разгибание – 0 |

Примечание. Исходное положение кисти в физиологическом состоянии полной пронации. Движения в межфаланговых суставах не рассматривались, как не имеющие отношения к разрабатываемой конструкции.

Из представленного анализа движений в суставах верхних конечностей хирурга видно, что кисть при выполнении операций является исполнительным органом, принимающим определенное положение для выполнения конкретной хирургической манипуляции с помощью взаимодействия с остальными суставами руки. Для хирурга элементы кисти играют еще одну немаловажную роль – тактильного распознавания (рельеф, размеры, подвижность, консистенция тканей в зоне операции). Полноценную работу кисти обеспечивают лучезапястный и пястнофаланговые суставы; плечевой и локтевой суставы имеют меньшее значение, но они ответственны за положение кисти при операциях.

Из приведенного анализа основных типовых движений верхней конечности при выполнении хирургических манипуляций мы сформулировали следующие клинично-анатомические требования к экзоскелету микрохирурга.

Разрабатываемый экзоскелет верхней конечности для микрохирургов должен отвечать следующим требованиям:

- обладать объемом движений, приближенным к показателям здорового человека (в идеале) или позволяющим обеспечить свободное движение рук при выполнении исследованного объема движений хирурга;
- фрагменты конструкции должны повторять строение верхней конечности человека;
- поддерживать конечность в нужном положении без применения усилий и без ограничения движений кисти;
- иметь легкую и прочную конструкцию;
- иметь возможность анатомической параметризации [8, 9];
- иметь возможность индивидуальной настройки в зависимости от характера выполняемой операции и положения хирурга во время ее проведения;
- быть изготовленным из биологически инертных материалов;
- иметь возможность стерилизации и (или) отграничения от зоны операции стерильным барьером;
- иметь возможность замены элементов конструкции экзоскелета по мере износа и включения дополнительных опций (модульный принцип);
- быть доступным по цене;
- иметь мобильную версию, размещенную на несущем жакете, и стационарную, размещенную на рабочем месте микрохирурга;
- быть независимым от источников питания;
- не зависеть от зарубежных комплектующих.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Актуальность выполненного нами исследования не вызывает сомнений, поскольку еще в 2012 г. врачи-офтальмологи, занимающиеся витреоретинальной микрохирургией, впервые получили от инженеров необходимое для них приспособление, предотвращающее «active tremor». Оно («Smart») позволяет удерживать кисть в случаях, когда необходимо использовать (чистить) источник оптической когерентной томографии [9].

Кроме того, разработка различных приспособлений не столько для профилактики, сколько для предотвращения тремора рук у людей, страдающих болезнью Паркинсона или эссенциальным тремором – наследственным заболеванием центральной нервной системы, еще раз подтверждает актуальность нашего исследования. Недавно компания Gyro Gear (Великобритания) заявила о разработке приспособления для борьбы с тремором (GyroGlove), которое поступит в продажу в конце 2016 г. (цена 600–900 \$). Надетая на руку перчатка (рис. 3) компенсирует колебания, благодаря чему движения становятся плавными. Стабилизация достигается за счет встроенного в перчатку гироскопа, внутри которого находится диск, совершающий около 20 тыс. об/мин. Новая разработка позволяет почти на 90% снизить тремор у больных. Заметим, что в этот старт-ап изначально было вложено более 700 тыс. фунтов стерлингов. Имеющийся у нас опыт разработки и внедрения пассивного экзоскелета верхних конечностей («ЭКЗАР») для пациентов, страдающих верхним вялым пара-(моно-)парезом, можно адаптировать для разработки экзоскелета для микрохирурга, выполняющего реконструктивные пластические операции продолжительностью от 6 до 10–11 ч.



Рис. 3. Приспособление для борьбы с тремором GyroGlove (Gyro Gear, Великобритания)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имеющийся у нас опыт разработки и внедрения пассивного экзоскелета верхних конечностей «ЭКЗАР» [4] для больных с верхним вялым пара-(моно-)парезом позволяют после

введения дополнительных опций, отвечающих изложенным выше клинко-анатомическим требованиям к экзоскелету микрохирурга, предложить его модернизацию для облегчения труда хирурга при выполнении прецизионных операций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Байтингер В.Ф., Селянинов К.В., Байтингер А.В. Введение в микрохирургию. – Томск, 2012. – 120 с.
2. Байтингер В.Ф., Цуканов А.И., Серяков В.И., Федоров Д.А. Свободные реваскуляризируемые лоскуты (free flaps): новая эра в пластической хирургии // Миниинвазивная хирургия в клинике и эксперименте: сб. тр. конференции. – Пермь, 2003. – С. 9–11.
3. Воробьев А.А., Андриященко Ф.А., Засыпкина О.А., Кривоножкина П.С. Особенности анатомической параметризации пассивного экзоскелета верхней конечности «ЭКЗАР» // Оренбургский медицинский вестник. – 2015. – Т. 3, № 4 (12). – С. 9–12.
4. Воробьев А.А., Андриященко Ф.А., Пономарева О.А., Соловьева И.О., Кривоножкина П.С. Разработка и клиническая апробация пассивного экзоскелета верхних конечностей «ЭКЗАР» // Современные технологии в медицине. – 2016. – Т. 8, № 2. – С. 90–97.
5. Воробьев А.А., Андриященко Ф.А., Засыпкина О.А., Кривоножкина П.С. Этапы анатомической параметризации экзоскелета верхней конечности «ЭКЗАР» // Журнал анатомии и гистопатологии. – 2015. – Т. 4, № 2. С. 27–30.
6. Воробьев А.А., Андриященко Ф.А., Соловьева И.О., Засыпкина О.А., Кривоножкина П.С., Поздняков А.М. Терминология и классификация экзоскелетов // Вестник ВолгГМУ. – 2015. – № 3 (55). – С. 71–78.
7. Воробьев А.А., Петрухин А.В., Засыпкина О.А., Кривоножкина П.В., Поздняков А.М. Экзоскелет как новое средство в абилитации и реабилитации инвалидов (обзор) // Современные технологии в медицине. – 2015. – Т. 7, № 2. – С. 185–197.
8. Капанджи А.И. Верхняя конечность. Физиология суставов. – М: Эксмо, 2014. – 368 с.
9. Active tremor cancellation by a “Smart” hand held vitreoretinal microsurgical tool using swept source optical coherence tomography – Optics Express, 27.09.2012, DOI: 10.1364/OE.20.023414
10. Ichihara S., Vaiss L., Carmona A. et al. The role of robotics in microsurgical reconstruction // Frontiers in Microsurgery of the Upper Extremity. Ed. B. Battiston, A.V. Georgescu., P.N. Soucacos. – Konstantaras Med. Pub., 2016. – P. 269–274.
11. 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. – V. 43 (5). – P. 583–590.

## REFERENCES

1. Baytinger V.F., Selyaninov K.V., Baytinger A.V. *Vvedenie v mikrohirurgiyu* [Introduction to the Microsurgery]. Tomsk, 2012. 120 p. (in Russian).
2. Baytinger V.F., Tsukanov A.I., Seryakov V.I., Fedorov D.A. *Svobodnye revaskulyariziruemye loskutyy (free flaps): novaya era v plasticheskoy hirurgii* [Free flaps: A new era in plastic surgery]. *Miniinvazivnaya hirurgiya v klinike i eksperimente* [Minimally invasive surgery in clinic and experiment: Conference Proceedings]. Perm, 2003. Pp. 9–11 (in Russian).
3. Vorobiyov A.A., Andryushchenko F.A., Zasypkina O.A. Krivonozhkina P.S. Osobennosti anatomicheskoy parametrizatsii passivnogo ekzoskeleta verhney konechnosti “EKZAR” [Features of the anatomical parameterization passive exoskeleton upper limbs “EXAR”]. *Orenburgskiy medicinskiy vestnik – Orenburg Medical Journal*, 2015, vol. 3, no. 4 (12), pp. 9–12 (in Russian).
4. Vorobiyov A.A., Andryushchenko F.A., Ponomareva O.A., Solovyeva I.O., Krivonozhkina P.S. *Razrabotka i klinicheskaya aprobatsiya passivnogo ekzoskeleta verhnih konechnostey “EKZAR”* [The Development and Clinical Testing of “EXAR”, Passive Upper Limb Exoskeleton]. *Sovremennyye tehnologii v medicine – Modern Technologies in Medicine*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 90–97 (in Russian).
5. Vorobiyov A.A., Andryushchenko F.A., Zasypkina O.A., Krivonozhkina P.S. *Etapy anatomicheskoy parametrizatsii ekzoskeleta verhney konechnosti “EKZAR”* [Development of anatomical parameters of the upper limb exoskeleton “EXAR”]. *Zhurnal anatomii i gistopatologii – Journal of Anatomy and Histopathology*, 2015, vol. 4, no. 2, pp. 27–30 (in Russian).

6. Vorobiyov A.A., Andryutshenko F.A., Zasyapkina O.A., Solovieva I.O., Krivonozhkina P.S., Pozdnyakov A.M. Terminologiya i klassifikaciya ekzoskeletov [Terminology and classification of exoskeleton]. *Vestnik VolgSMU – Journal of VolgSMU*, 2015, no. 3 (55), pp. 71–78 (in Russian).
7. Vorobiyov A.A., Petrukhin A.V., Zasyapkina O.A., Krivonozhkina P.S., Pozdnyakov A.M. Ekzoskelet kak novoe sredstvo v abilitacii i reabilitacii invalidov (obzor) [Exoskeleton as a New Means in Habilitation and Rehabilitation of Invalids (Review)]. *Sovremennye tehnologii v medicine – Modern Technologies in Medicine*, 2015, vol. 7, no. 2, pp. 185–197 (in Russian).
8. Kapandzhi A.I. *Verhnyaya konechnost'. Fiziologiya sustavov* [Upper limb. Physiology of the joints]. Moscow, Eksmo Publ., 2014. 368 p. (in Russian).
9. Active tremor cancellation by a “Smart” hand held vitreoretinal microsurgical tool using swept source optical coherence tomography – *Optics Express*, 27.09.2012, DOI: 10.1364/OE.20.023414
10. Ichihara S., Vaiss L., Carmona A. et al. The role of robotics in microsurgical reconstruction. *Frontiers in Microsurgery of the Upper Extremity*. Ed. B. Battiston, A.V. Georgescu., P.N. Soucacos. Konstantaras Med. Pub., 2016. Pp. 269–274.
11. 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, vol. 43 (5), pp. 583–590.

*Поступила в редакцию 16.08.2016  
Утверждена к печати 23.11.2016*

**Авторы:**

**Воробьёв Александр Александрович** – д-р мед. наук, профессор, зав. кафедрой топографической анатомии оперативной хирургии Волгоградского государственного медицинского университета (г. Волгоград).

**Никулин Артём Александрович** – врач пластический хирург АНО «НИИ микрохирургии» (г. Томск).

**Андрющенко Фёдор Андреевич** – канд. мед. наук, ст. науч. сотрудник Волгоградского научного медицинского центра (г. Волгоград).

**Байтингер Андрей Владимирович** – врач-хирург АНО «НИИ микрохирургии» (г. Томск).

**Контакты:**

**Воробьёв Александр Александрович**

тел.:

e-mail: [cos@Volgmed.ru](mailto:cos@Volgmed.ru)