

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА НОВЫХ ПОДХОДОВ К СОЗДАНИЮ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРОТЕЗОВ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

Д.З. Шибкова, shibkova2006@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8583-6821>

В.В. Эрлих, erlikhvuv@susu.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4416-1925>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Цель: обосновать наиболее перспективные подходы к технологии разработки протезов нижней конечности на основе теоретико-методологического анализа новейшей информации и практических разработок по тематике исследования. **Материалы и методы.** Проведен анализ теоретических, методологических и методических статей из базы данных Scopus и РИНЦ с целью выявления и обобщения перспективных подходов к созданию отечественных функциональных протезов нового поколения. **Результаты.** С точки зрения теории управления существуют два основных критерия для выбора параметров максимально функционального протеза: достижение цели движения и минимизация затраченных ресурсов. Для пациентов с протезами бедра и голени оптимальной по энергетическим затратам является ходьба в произвольном темпе. На основе методов структурного и функционального анализа положений теории автоматического управления предложены схемы управления бионическими протезами, отличающиеся простотой настройки, повышенной надежностью, удобством использования, что позволит максимально заменить ампутированную конечность при значительно меньших по сравнению с зарубежными образцами затратах. Выполнен ряд оригинальных научных исследований, нацеленных на реализацию комплексного подхода к решению проблемы. Разработаны конструкции макета модульного бионического протеза голени и стопы, в том числе из новых композитных материалов, а также предложена реализация человеко-машинного интерфейса. **Заключение.** Теоретико-методологическим обоснованием новых технологий производства протезов должен стать системный подход, который обеспечит решение трех взаимосвязанных задач: технологической (повышение функциональности протезов, в том числе за счет композитных материалов), биомеханической (снижение энергетических ресурсов организма и повышение комфортности выполнения сложных видов двигательных действий), социальной (повышение качества жизни потребителя и адекватности стоимости медицинского реабилитационного изделия).

Ключевые слова: биомеханические показатели ходьбы, оценка эффективности движений, ресурсосберегающий подход, функциональный протез нижних конечностей

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ FENU-2023-0017 (2023217Г3)

Для цитирования: Шибкова Д.З., Эрлих В.В. Теоретико-методическое обоснование выбора новых подходов к созданию функциональных протезов нижних конечностей // Человек. Спорт. Медицина. 2024. Т. 24, № 4. С. 173–181. DOI: 10.14529/hsm240422

Review article
DOI: 10.14529/hsm240422

THEORETICAL AND METHODOLOGICAL SUBSTANTIATION OF NOVEL APPROACHES TO LOWER LIMB PROSTHESES DEVELOPMENT

D.Z. Shibkova, shibkova2006@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8583-6821>

V.V. Erlikh, erlikhvuv@susu.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4416-1925>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Aim: this paper substantiates the most promising approaches to lower limb prostheses development based on a comprehensive analysis of recent information and practical developments in the field. **Materials and methods.** The paper provides a comprehensive review of theoretical, methodological, and empirical articles from Scopus and RSCI databases to identify and summarize promising approaches for

creating functional prostheses of the new generation. **Results.** Our analysis reveals two primary criteria for optimizing prosthetic parameters according to control theory: achieving movement goals and minimizing resource consumption. For hip and shin prostheses, walking at arbitrary paces is energetically optimal. Based on structural and functional analysis from control theory, the authors propose control schemes for bionic prostheses characterized by ease of setup, increased reliability, and user-friendliness. These designs aim to replace the amputated limb with significantly lower costs compared to foreign models. Original scientific studies have been conducted implementing an integrated problem-solving approach. Modular bionic prosthesis designs for lower leg and foot, including those using novel composite materials, have been developed, along with proposed human-machine interfaces. **Conclusion.** The theoretical and methodological justification of new prosthetic technologies should encompass a systematic approach that addresses three interrelated tasks: technological (enhancing functionality through composite materials); biomechanical (reducing body energy expenditure and improving comfort in complex motor actions); and social (improving quality of life and cost-effectiveness of medical rehabilitation products).

Keywords: biomechanical indicators, effectiveness of movement, resource-efficient approach, functional prosthesis, lower limb prosthesis

Acknowledgments: This work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation: FENU-2023-0017 (2023217Г3).

For citation: Shibkova D.Z., Erlikh V.V. Theoretical and methodological substantiation of novel approaches to lower limb prostheses development. *Human. Sport. Medicine.* 2024;24(4):173–181. (In Russ.) DOI: 10.14529/hsm240422

Введение. В сфере производства ортопедических изделий значительно возрос запрос потребителей на новое поколение протезов, в том числе и в связи с ограничением поставок от зарубежных производителей. Так, в 2020 году доля поставок протезов в общем объеме из США, Ирландии и Германии составила в совокупности более 50 %. При этом на внутреннем рынке доля продукции реабилитационной направленности возросла с 17 % в 2020 году до 50 % в 2022 и продолжает увеличиваться. В России реабилитационная индустрия представлена 250 производителями, ведущими собственные разработки, и за прошедшие пять лет было поставлено более 300 различных отечественных технических решений для людей с инвалидностью [14]. Современные бионические протезы верхних и нижних конечностей в стране разрабатывают и производят порядка 50 производителей, в том числе: ФГУП «ЦИТО», «Метиз», НОЦ «Ортос», «Медитроника Фут Системс», «Салют Орто», НПК «СПП», «Ортокосмос», НПФ «Галатея», «Моторика», «Техбионик», «Сколиолоджик.ру» [9]. Вместе с тем прогнозируемый в дальнейшем рост числа потребителей протезно-ортопедических изделий, связанный с увеличением нуждающихся в технических средствах реабилитации, актуализирует отечественного производителя. Отказ от протезов иностранного производства связан с невозможностью потребителя получать ремонт изделий, гарантированный производителем.

Реализовать реабилитационные медицинские устройства с более удобным управлением, понизить их себестоимость и расширить объем производства, заполняя рынок отечественными конкурентоспособными изделиями, позволит разработка систем пропорционального антропоморфного управления биоэлектрическими механическими устройствами на основе сигналов ЭМГ и биоимпеданса [5].

Цель исследования: обосновать наиболее перспективные подходы к технологии разработки протезов нижней конечности на основе теоретико-методологического анализа новейшей информации и практических разработок по тематике исследования.

Материалы и методы. Был проведен анализ теоретических, методологических и методических статей, индексированных в базах данных Scopus и РИНЦ, что позволило обобщить, сравнить и выявить перспективные подходы к разработке отечественных функциональных протезов нижней конечности. Из первичной выборки, в том числе обзоров и оригинальных статей, по ключевым словам «биомеханические показатели ходьбы», «оценка эффективности движений», «ресурсосберегающий подход» были отобраны 20 публикаций, из которых 60 % опубликованы за последние 5 лет.

Результаты исследования. Национальный стандарт ГОСТ Р 53869-2021 определяет все технические требования к протезам нижних конечностей в зависимости от уровня

ампутации конечности [6]. Протезы должны обеспечивать потребителя статическими и динамическими возможностями: стояния, сидения, приседания; возможностью ходьбы по ровной поверхности в произвольном темпе, в ускоренном темпе и по наклонной поверхности в сагиттальном направлении вверх и вниз; возможностью ходьбы по лестнице и по пересечённой местности и т. д. [11].

Базовым отличием протеза от здоровой ноги является отсутствие как эфферентного управления мышцами, так и афферентной чувствительности, в связи с чем для разработки максимально функционального протеза, выбора его параметров необходимо определить критерии оптимальности выполняемых движений. С точки зрения теории управления существуют два основных критерия: достижение цели движения и минимизация затраченных ресурсов. Третий критерий биологический – это безопасность для организма пациента [13]. Сравнительный анализ биомеханических показателей ходьбы пациентов с различным уровнем ампутации нижней конечности на экзопротезе при фиксированном темпе ходьбы проведен [2] с участием пациентов с ампутацией на уровне бедра и на уровне голени, использующих серийно выпускаемые протезы нижней конечности. Оценка ходьбы у испытуемых проводилась на аппарате Walkway в произвольном темпе и в двух фиксированных темпах – 80 шагов в минуту (0,8 м/с) и 50 шагов в минуту (0,4 м/с). Были проанализированы наиболее информативные биомеханические показатели ходьбы и выявлены изменения пространственно-временных и динамических показателей у пациентов с различным уровнем ампутации нижней конечности на экзопротезе. Определенный коридор «условной нормы» показателей ходьбы на протезе бедра в большей степени отличался от коридора нормы биомеханических показателей ходьбы для здоровых людей, чем коридор «условной нормы» показателей ходьбы на протезе голени. Следовательно, для пациентов, пользующихся протезами бедра и голени, оптимальной в отношении энергетических затрат на поддержание вертикальной позы является ходьба в произвольном темпе и в приближенном к произвольному темпу [2].

Большому расходу энергии при ходьбе на протезе способствует множество факторов. Например, при опоре на протез с выпрямленным коленом центр тяжести тела во время

фазы опоры поднимается выше, чем при естественной походке, что требует выполнения дополнительной механической работы [13]. Для оценки эффективности протезирования нижних конечностей пациентов и инструментального обеспечения универсальной измерительно-информационной системы Л.М. Смирновой (2017) проанализированы возможности производства такой системы и особенности ее программного обеспечения [16].

Используя методы структурного и функционального анализа основных положений теории автоматического управления, Г.А. Солодимова и А.Н. Спиркин (2018) предложили схему системы управления бионическим протезом, отличающуюся простотой настройки, повышенной надежностью, удобством использования, что позволяет максимально заменить утраченную в результате ампутации конечность при значительно меньших по сравнению с зарубежными образцами затратах [19].

Для конструирования активного экзоскелета нижних конечностей теоретическая база позволяет провести анализ механических и бионических процессов ходьбы человека, описание конструкции прототипа экзоскелета и схемы, которая представляет собой человека, интегрированного с экзоскелетом. В работе [1] описаны основные электрические компоненты системы: микроконтроллер, электроприводы и их платы управления, аккумулятор, датчики углов и бионические сенсоры. С точки зрения решаемой проблемы в статье отражена информация по обзору основных групп мышц таза и бедра, их функции при сгибании и разгибании суставов; введен критерий качества алгоритма управления, который основан на бионических особенностях работы мускулатуры человека, а также предложены идеи практической модернизации механической, электрической и вычислительной систем экзоскелета. Обзор подходов к созданию биоуправляемых протезов, их классификация по системе управления и механизм распознавания движения, лежащий в основе интерфейса «человек – протез», был представлен в [7], а также предложен вариант развития технологий биоуправляемых протезов в будущем.

Классические методы теории механизмов и машин использовались для решения задачи конструирования механизма искусственной стопы с подвижным шарниром [18]. Управление стопой протеза должно быть строго коррелировано с управлением в коленном и тазо-

бедренном суставе и адаптивным к текущей моторной ситуации в различных режимах стояния и ходьбы. Авторами предложена конструкция искусственной стопы, выполняющей тыльное сгибание (подгибание) в достаточном объёме для формирования должного клиренса переноса и уменьшения хромоты. В структуру системы управления стопой протеза при ампутациях в нижней и средней трети голени введен блок детектирования и функционального преобразования с использованием широтно-импульсной модуляции, что обеспечивает формирование «гладкого» однополярного сигнала для её привода с максимальной защитой от помех. Разработанная комбинированная система автоматизированного управления стопой протеза голени с позиционной обратной связью от встроенного в шарнир датчика обеспечивает плавность движений, а подкосоустойчивость в опоре осуществляется активацией муфты самоторможения [18]. Предложенная авторами конструкция адаптивной управляемой стопы отвечает требованиям удобства и простоты использования протеза, надёжности, технического мониторинга и доступности цены.

В данном направлении выполняется ряд оригинальных научных исследований, нацеленных на реализацию комплексного подхода к решению проблемы. Разработана и исследована механическая конструкция макета модульного бионического протеза ноги и системы управления протезом, а также предложена реализация человеко-машинного интерфейса [4]. В основе выполненного исследования – анализ ЭМГ-сигналов с поверхности крупных мышц нижней конечности с использованием двух видов миоэлектрических датчиков при выполнении основных двигательных действий при ходьбе. Предложенная модульная механическая конструкция протеза (голеностопный модуль может использоваться отдельно), система управления которой позволяет пользователю комфортно передвигаться как по ровной поверхности, так и в условиях различных препятствий.

Проведена сравнительная оценка кинематики движений испытуемых со схожими антропометрическими данными, в частности здорового человека и ампутанта левой нижней конечности на уровне верхней 1/3 бедра с использованием компьютерного комплекса захвата движений Xsens. Ходьба со скоростью 3 км/ч на расстояние 100 м проводилась на

беговой дорожке Life Fitness. Для косвенного определения энергетической стоимости ходьбы проводилось измерение ЧСС до ходьбы и сразу после. В ходе анализа данных по кинематике движений были выявлены биомеханические особенности и энергетические затраты у испытуемых при ходьбе. Так, у испытуемого с протезом при ходьбе на тредбане со скоростью 3 км/ч были зафиксированы большие вертикальные колебания таза на 28,5 %, большая вариация вертикальных ускорений таза, увеличение ЧСС на 29,7 %, что в совокупности с кинематическими параметрами ходьбы свидетельствует о существенно большем количестве энергии, затрачиваемой на движение. Поскольку центр тяжести расположен в зоне таза, то для повышения оперативности отмеченных выше измерений для будущих исследований предлагается использовать тазовый сенсор (pelvis). В этом случае не потребуются численное дифференцирование, так как система Xsens это делает на аппаратном уровне для всех сегментов тела человека [20]. Используя данные по биомеханике ходьбы и энергозатрат ампутанта, авторский коллектив спроектировал элементы протеза коленного сустава из композитных материалов [12]. Была разработана новая конструкция четырёхзвенового механического протеза коленного сустава из тканевого стеклопластика на основе эпоксидной смолы, который был основным материалом стержневых элементов протеза. В пакете SolidWorks была создана трёхмерная модель протеза коленного сустава Total Knee 1000/2000 фирмы Össur (Исландия). Механические испытания образца стержневого элемента были проведены на машине Instron 5900R. С использованием метода конечных элементов (пакет ANSYS) был проведен анализ напряженно-деформированного состояния модельного образца и трёхмерной модели протеза коленного сустава. На основе анализа кинезиметрии ходьбы при скорости 3 км/ч на комплексе Xsens получено, что протез испытывает существенные сжимающие нагрузки лишь в фазе перекачивания с пятки на носок. При этом нагрузки на протез могут в два раза превосходить вес человека. Новая конструкция коленного протеза предполагает использование в стержневых элементах высокопрочного стеклопластика вместо дорогих титановых и алюминиевых сплавов аналогичного протеза фирмы Össur (Исландия). Расчёт нагрузок в элементах протеза и эксперименты

на модельных образцах показали, что новые стержневые элементы могут иметь вес в 2–3 раза меньший, чем у аналога. Это позволяет рассматривать композитные материалы в качестве перспективных при изготовлении новых образцов коленных протезов [12].

Ко второй группе критериев следует отнести медико-биологические и социальные факторы – обеспечение безопасности и повышение качества жизни для потребителей ортопедических изделий, в том числе протезов нижних конечностей.

В процессе полноценной реабилитации после ампутации конечности и медицинского восстановления следуют этапы подготовки к протезированию, протезирования, развития физических качеств ампутантов, каждый из которых имеет специальную направленность и способствует, в первую очередь, улучшению функциональности, а также повышению качества жизни ампутантов [10]. Важным фактором является и установленная высокая частота встречаемости симптомов и факторов риска остеоартрита коленного сустава у инвалидов с односторонней транстибиальной ампутацией, что указывает на необходимость индивидуального подхода к реабилитации данного контингента для профилактики прогрессирования патологического состояния [3].

По мнению Л.М. Смирновой (2022), при протезировании не уделяется должного внимания необходимости снижения перегрузок на здоровую конечность, не учитывается, что при ходьбе на протезе сохранная конечность, компенсируя нарушения статодинамической функции протезированной конечности, испытывает значительные перегрузки, повышающие риск заболеваний суставов конечности и деформаций стопы. В исследовании на основе программно-аппаратного комплекса с матричными измерителями давления в форме стелек была установлена связь между уровнем ампутации конечности и показателями биомеханики ходьбы в опорном контуре стоп. Наиболее чувствительными биомеханическими показателями перегрузки сохранной стопы при ходьбе на протезе оказались билатеральная асимметрия продолжительности переката через стопы и билатеральная асимметрия условной работы переката через стопы, а также гиперпрессия в области носка или латерального края плантарной поверхности [17]. Для своевременного и грамотного снижения риска перегрузки сохранной конечности

необходимо использование ортопедической стельки.

Реализуемый в настоящее время переход к высокотехнологичному здравоохранению, персонифицированной медицине и повышению качества жизни пациентов, нуждающихся в протезах, обуславливает необходимость учета компенсаторной повышенной функциональной нагрузки на здоровую часть организма ампутанта.

Заключение. Фактически проблема разработки новых технологий ортопедических изделий, в том числе протезов нижних конечностей, остается весьма актуальной и требует дальнейшей как научно-теоретической, так и практической реализации. Известно, что измененная биомеханика походки при односторонней ампутации приводит к негативным результатам процесса реабилитации [22], что походка на протезе становится несимметричной, а длительная асимметрия сопровождается изменениями в мышечно-скелетном аппарате дегенеративной направленности [21]. Эти негативные последствия в процессе реабилитации должны учитываться и снижаться на основе адекватных технологических решений, в том числе за счет использования новых композитных материалов при моделировании протезов.

По мнению Р.А. Прокопенко, эффективная ходьба на протезе будет отличаться от ходьбы здорового человека и попытки максимально приблизить биомеханику ходьбы на протезе к биомеханике ходьбы здорового человека оправданы лишь частично. В большинстве исследований предпринимаются попытки имитировать ходьбу здорового человека, тогда как необходимо решать комплексную задачу ходьбы на протезе. Другая перспектива связана с развитием интерфейса управления протезом, т. е. имитации эфферентных и афферентных сигналов ноги [13]. Эффективное управление полностью приводимых в действие устройств может устранить текущие ограничения протезных устройств, потенциально улучшая равновесие, комфорт и симметрию ходьбы у людей с ампутацией нижних конечностей [8]. Представлен концепт остеointеграционной системы экзопротеза бедра с нейромышечным интерфейсом. Перспективным и более эффективным способом организации биологического управления является применение инвазивных электродов, использование которых обеспечивает более точный и гибкий

контроль, что обеспечивается независимостью сигнала от положения конечности и условий окружающей среды, низкой зашумленностью сигнала, распознаванием отдельных мышц, четким сигналом даже при небольшом мышечном усилии, снижающем утомляемость пациента. Разработанный концепт имеет практическое значение и может стать ориентиром для инженеров и исследователей в области киберпротезирования [15].

Повышение функциональности протеза, в том числе за счет использования композитных материалов, значительно снизит затраты метаболической энергии пользователя и существенно отразится на качестве его жизни. Наряду с этим современные технологии проектирования ориентируются на численные методы при

назначении размеров деталей, что позволяет снизить цену конечного изделия.

Таким образом, выполненное исследование показывает, что теоретико-методологическим обоснованием новых технологий производства протезов должен стать системный подход, который обеспечит решение трех взаимосвязанных задач: технологической (повышение функциональности протезов, в том числе за счет композитных материалов), биомеханической (снижение энергетических ресурсов организма и повышение комфортности выполнения сложных видов двигательных действий), социальной (повышение качества жизни потребителя и адекватности стоимости медицинского реабилитационного изделия).

Список литературы

1. Барынкин, И.С. Проектирование и исследование новой конструкции активного экзоскелета нижних конечностей / И.С. Барынкин, А.С. Смирнов // *Экстремальная робототехника*. – 2022. – № 1 (33). – С. 505–521.
2. Влияние темпа на параметры ходьбы здоровых и пациентов с разным уровнем ампутации конечности / Н.Н. Рукина, А.Н. Белова, А.Н. Кузнецов, В.В. Борзиков // *Рос. журнал биомеханики*. – 2016. – Т. 20, № 1. – С. 58–69. DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2016.1.05
3. Встречаемость симптомов остеоартрита у инвалидов с односторонней трансбибиальной ампутацией на этапе первичного протезирования / О.И. Хохлова, Е.М. Васильченко, А.М. Берман, О.В. Жатько // *Реабилитация – XXI век: традиции и инновации: сб. ст. IV Нац. конгресса с междунар. участием (08–09 сент. 2021 г.)*. – СПб.: ООО «ЦИАЦАН», 2021. – С. 277–284.
4. Гладышев, А.Р. Разработка и исследование механической конструкции макета модульного бионического протеза ноги и системы управления / А.Р. Гладышев, А.В. Гладышева // *Фундамент. и приклад. проблемы техники и технологии*. – 2018. – № 1 (327). – С. 139–145.
5. Гойдина, Т.А. Исследование рынка систем управления биоэлектрическими протезами верхних конечностей / Т.А. Гойдина, А.В. Кобелев, А.В. Писарева // *Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2020: тр. XIV Междунар. науч. конф. с науч. молодежной школой им. И.Н. Спиридонова (01–03 июля 2020 г.)*. Т. 1: Владимир-Суздаль: Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых. – 2020. – С. 218–226.
6. ГОСТ Р 53869-2021. Протезы нижних конечностей. Технические требования. – М.: Стандартинформ, 2021. – 12 с.
7. Завьялов, С.А. Технологии биоуправляемых протезов сегодня и завтра / С.А. Завьялов, А.Ю. Мейгал // *Journal of Biomedical Technologies*. – 2015. – № 2. – С. 36–42.
8. Исаева, Е.К. Разработка бионического протеза для нижних конечностей / Е.К. Исаева // *Студенческая научная весна: тез. докл. Всерос. студенческой конф., посвящ. 175-летию Н.Е. Жуковского (01–30 апр. 2022 г.)*. – М.: Издат. дом «Научная библиотека», 2022. – С. 182–183.
9. Министр промышленности РФ Денис Мантуров провёл совещание по развитию производства протезно-ортопедических изделий в России // *INFOLine, ИА (по материалам Правительства РФ)*. 2023. – https://advis.ru/php/view_news_ajax.php?id=FF293EA7-1C24-904B-AD2B-E7B64550830B (дата обращения: 07.04.2024).
10. Образцов, М.С. Физические упражнения в реабилитации после ампутации конечности / М.С. Образцов, О.А. Савченко, И.А. Бебко // *Актуальные вопросы физического воспитания и адаптивной физической культуры в системе образования: сб. материалов VI Всерос. с междунар. участием науч.-практич. конф. (18–19 апр. 2024 г.)*. – Волгоград: Волгоград. гос. академия, 2024. – С. 94–98.

11. Проект методических рекомендаций (приложение к Письму ФБМСЭ от 14.06.2023 № 35221.ФБ.77/2023) Ч. 15.2. Протезы нижних конечностей. – https://www.invalidnost.com/MSE/FB/2023/TSR/Projekt_MR_po_proteзам_NK.pdf (дата обращения: 04.04.2024).
12. Проектирование элементов протеза коленного сустава из композитов / С.Б. Сапожников, А.В. Безмельницын, М.В. Жихарев и др. // *Человек. Спорт. Медицина*. – 2023. – Т. 23, № 4. – С. 163–171. DOI: 10.14529/hsm230420
13. Прокопенко, Р.А. Протез коленного сустава при ампутации на уровне бедра / Р.А. Прокопенко // *Физиотерапия, бальнеология и реабилитация*. – 2016. – Т. 15, № 1. – С. 43–48. DOI: 10.18821/1681-3456-2016-15-1-43-48
14. Резник, И. Части тела: как рынок протезов в России пошел на взлет / И. Резник // *Мед. технологии*. 05.02.2024. – <https://www.rbc.ru/industries/news/65377d919a7947c1f7a2dd21> (дата обращения: 04.04.2024).
15. Синегуб, А.В. Концепт остеointеграционной системы экзопротеза бедра с нейромышечным интерфейсом / А.В. Синегуб, М.В. Черникова, Е.В. Фогт // *Системы. Методы. Технологии*. – 2023. – № 3 (59). – С. 31–37. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-3-31-37.
16. Смирнова Л.М. Инструментальное обеспечение универсальной измерительно-информационной системы для оценки эффективности протезирования и ортезирования нижних конечностей / Л. М. Смирнова // *Биотехносфера*. – 2017. – № 5 (53). – С. 10–16.
17. Смирнова Л.М. Перегрузка сохранной стопы как показатель необходимости ортопедического обеспечения пациентов после ампутации нижней конечности // *Физ. и реабилитац. медицина*. – 2022. – Т. 4, № 4. – С. 34–43. DOI: 10.26211/2658-4522-2022-4-4-34-43
18. Создание системы автоматического управления бионическим роботизированным протезом голени / Г.Н. Буров, О.Л. Белянин, В.А. Большаков, А.С. Дробаха // *Физ. и реабилитац. медицина*. – 2022. – Т. 4, № 4. – С. 44–50. DOI: 10.26211/2658-4522-2022-4-4-44-50
19. Солодимова, Г.А. Информационно-измерительная система бионического протеза нижней конечности / Г.А. Солодимова, А.Н. Спиркин // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. – 2018. – № 1 (23). – С. 57–65. DOI: 10.21685/2307-5538-2018-1-9
20. Эрлих, В.В. Биомеханика ходьбы в норме и при наличии протеза ноги с использованием комплекса Xsens / В.В. Эрлих, В.В. Епишев, С.Б. Сапожников // *Человек. Спорт. Медицина*. – 2023. – Т. 23, № 4. – С. 145–154. – DOI: 10.14529/hsm230418
21. Kaufman, K.R. Gait asymmetry of transfemoral amputees using mechanical and microprocessor-controlled prosthetic knees / K.R. Kaufman, S. Frittoli, C.A. Frigo // *Clinical Biomechanics*. – 2012. – Vol. 27 (5). – P. 460–465. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2011.11.011
22. Morgenroth, D.C. Osteoarthritis in the disabled population: a mechanical perspective / D.C. Morgenroth, A.C. Gellhorn, P. Suri // *Physical medicine and rehabilitation*. – 2012. – Vol. 4 (5). – P. S20–S27. – DOI: 10.1016/j.pmrj.2012.01.003

References

1. Barynkin I.S., Smirnov A.S. [Design and Research of a New Construction of the Lower Limb Active Exoskeleton]. *Ekstremal'naya robototekhnika* [Extreme Robotics], 2022, no. 1 (33), pp. 505–521. (in Russ.)
2. Rukina N.N., Belova A.N., Kuznetsov A.N., Borzikov V.V. [The Influence of Walking Tempo on Biomechanical Parameters of Healthy Individuals and Patients with Different Levels of Lower Extremity Amputation]. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki* [Russian Journal of Biomechanics], 2016, vol. 20, no. 1, pp. 58–69. (in Russ.) DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2016.1.05
3. Khokhlova O.I., Vasil'chenko E.M., Berman A.M., Zhat'ko O.V. [The Occurrence of Osteoarthritis Symptoms in People with Disabilities with Unilateral Transtibial Amputation at the Stage of Primary Prosthetics]. *Reabilitatsiya – XXI vek: traditsii i innovatsii. IV Natsional'nyi kongress s mezhdunarodnym uchastiem* [Rehabilitation – XXI Century. Traditions and Innovations. IV National Congress with International Participation], 2021, pp. 277–284. (in Russ.)
4. Gladyshev A.R., Gladysheva A.V. [Development and Research of Mechanical Design Layout Modularbionic Leg Prosthesis and Control System]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2018, no. 1 (327), pp. 139–145. (in Russ.)

5. Goidina T.A., Kobelev A.V., Pisareva A.V. [Market Research of Control Systems for Bioelectric Upper Limb Prostheses]. *Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii – FREME'2020. XIV Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya s nauchnoi molodezhnoi shkoloi im. I.N. Spiridonova* [XIV International Scientific Conference with I.N. Spiridonov Scientific Youth School], 2020, vol. 1, pp. 218–226. (in Russ.)

6. GOST 53869-2021. *Protezy nizhnikh konechnostey. Tekhnicheskiye trebovaniya* [Lower Limb Prostheses. Technical Requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2021. 12 p.

7. Zavyalov S.A., Meigal A.Yu. The Bio-controlled Prosthesis Technologies Today and Tomorrow. *Journal of Biomedical Technologies*, 2015, no. 2, pp. 36–42.

8. Isaeva E.K. [Development of a Bionic Prosthesis for the Lower Extremities]. *Vserossiyskaya studencheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 175-letiyu N.E. Zhukovskogo* [Student Scientific Spring. All-Russian Student Conference dedicated to the 175th anniversary of N.E. Zhukovsky], 2022, pp. 182–183. (in Russ.)

9. *Ministr promyshlennosti RF Denis Manturov provel soveshchanie po razvitiyu proizvodstva protezno-ortopedicheskikh izdelii v Rossii* [Denis Manturov, Minister of Industry of the Russian Federation, held a Meeting on the Development of the Production of Prosthetic and Orthopedic Products in Russia], INFOLine, IA (Based on Materials from the Government of the Russian Federation). 2023. Available at: https://advis.ru/php/view_news_ajax.php?id=FF293EA7-1C24-904B-AD2B-E7B64550830B (accessed 07.04.2024). (in Russ.)

10. Obratsov M.S., Savchenko O.A., Bebko I.A. [Physical Exercises in Rehabilitation After Limb Amputation]. *Aktual'nye voprosy fizicheskogo vospitaniya i adaptivnoy fizicheskoy kul'tury v sisteme obrazovaniya. VI Vserossiyskaya s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Topical Issues of Physical Education and Adaptive Physical Culture in the Education System. VI All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation], 2024, pp. 94–98. (in Russ.)

11. *Proekt metodicheskikh rekomendatsii (prilozhenie k Pis'mu FBMSE ot 14.06.2023 № 35221.FB.77/2023) Chast' 15.2. Protezy nizhnikh konechnostei* [Draft Methodological Recommendations (Annex to the Letter of the ITU FB dated 06.14.2023 no. 35221.FB.77/2023) Part 15.2. Lower Limb Prostheses]. Available at: https://www.invalidnost.com/MSE/FB/2023/TSR/Proekt_MR_po_protezam_NK.pdf (accessed 04.04.2024). (in Russ.)

12. Sapozhnikov S.B., Bezmelnitsyn A.V., Zhikharev M.V. et al. Design of knee Joint Prosthetic Elements Made of Composites. *Human. Sport. Medicine*, 2023, vol. 23 (4), pp. 163–171. (in Russ.) DOI: 10.14529/hsm230420

13. Prokopenko R.A. [The Use of the knee Joint Replacement Prosthesis After the Amputation at the Level between Hip and knee]. *Fizioterapiya, bal'neologiya i reabilitatsiya* [Russian Journal of Physiotherapy, Balneology and Rehabilitation], 2016, vol. 15, no. 1, pp. 43–48. (in Russ.) DOI: 10.18821/1681-3456-2016-15-1-43-48

14. Reznik I. [Body Parts. How the Prosthetics Market in Russia Took Off]. *Meditsinskiye tekhnologii* [Medical Technologies]. Available at: <https://www.rbc.ru/industries/news/65377d919a7947c1f7a2dd21> (accessed 04.04.2024)

15. Sinegub A.V., Chernikova M.V., Fogt E.V. [Concept of an Osteointegration System for a hip Exoprosthesis with a Neuromuscular Interface]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2023, no. 3 (59), pp. 31–37. (in Russ.) DOI: 10.18324/2077-5415-2023-3-31-37

16. Smirnova L.M. [Instrumental Support of a Universal Measuring and Information System for Evaluating the Effectiveness of Prosthetics and Orthotics of the Lower Extremities]. *Biotekhnosfera* [Biotechnosphere], 2017, no. 5 (53), pp. 10–16. (in Russ.)

17. Smirnova L.M. [Overloading of the Intact Foot as an Indicator of the Need for Orthopedic Support for Patients After Amputation of the Lower Limb]. *Fizicheskaya i reabilitacionnaya medicina* [Physical and Rehabilitation Medicine], 2022, vol. 4(4), pp. 34–43. (in Russ.) DOI: 10.26211/2658-4522-2022-4-4-34-43

18. Burov G.N., Belyanin O.L., Bolshakov V.A., Drobakha A.S. [Creation of Automatic Control System for Bionic Robotic Below Knee Prosthesis]. *Fizicheskaya i reabilitacionnaya medicina* [Physical and Rehabilitation Medicine], 2022, vol. 4 (4), pp. 44–50. (in Russ.) DOI: 10.26211/2658-4522-2022-4-4-44-50

19. Solodimova G.A., Spirkin A.N. [The Information-measuring System Bionic Prosthesis of the Lower Limb]. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measuring. Monitoring. Management. Control], 2018, no. 1 (23), pp. 57–65. (in Russ.) DOI: 10.21685/2307-5538-2018-1-9

20. Erlikh V.V., Epishev V.V., Sapozhnikov S.B. Gait Biomechanics in Normal Conditions and with a Lower-extremity Prosthesis Captured by the Xsens System. *Human. Sport. Medicine*, 2023, vol. 23 (4), pp. 145–154. (in Russ.) DOI: 10.14529/hsm230418

21. Kaufman K.R., Frittoli S., Frigo C.A. Gait Asymmetry of Transfemoral Amputees Using Mechanical and Microprocessor-controlled Prosthetic knees. *Clinical Biomechanics*, 2012, vol. 27 (5), pp. 460–465. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2011.11.011

22. Morgenroth D.C., Gellhorn A.C., Suri P. Osteoarthritis in the Disabled Population: a Mechanical Perspective. *Physical Medicine and Rehabilitation*, 2012, vol. 4 (5), pp. 20–27. DOI: 10.1016/j.pmtj.2012.01.003

Информация об авторах

Шибкова Дарья Захаровна, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательского центра спортивной науки, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Эрлих Вадим Викторович, доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры теории и методики физической культуры и спорта, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Information about the authors

Daria Z. Shibkova, Doctor of Biological Sciences, Professor, Chief Researcher, Research Center for Sports Science, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Vadim V. Erlikh, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Theory and Methods of Physical Education and Sport, Chelyabinsk, Russia

Вклад авторов:

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

The authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 05.06.2024

The article was submitted 05.06.2024