

## БИОПРОТЕЗИРОВАНИЕ. ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОСТЬ

Морозов А.М.<sup>1</sup>, Кадыков В.А.<sup>1</sup>, Любский И.В.<sup>1</sup>, Аскеров Э.М.<sup>1</sup>, Пахомов М.А.<sup>1</sup>,  
Городничев К.И.<sup>1</sup>, Пельтихина О.В.<sup>1</sup>, Хорак К.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Тверской государственный медицинский университет Минздрава России», Тверь, e-mail: ammorozovv@gmail.com

По данным статистики около 12% населения Земли имеют нарушения функций и структур организма, препятствующие физической активности, а также затрудняющие социальную жизнь и профессиональную деятельность человека. Для адаптации людей, перенесших ампутацию, необходимы не только психологическая помощь и реабилитационная лечебная физкультура, но и разработка наиболее функционального протеза, отвечающего также и эстетическим требованиям современного человека. Целью нашего исследования было оценить качество и возможный функционал современных биопротезов, а также определить перспективы их использования в существующих условиях. Был проведен классический анализ литературных источников, как российских, так и иностранных, в том числе доступных в сети Интернет. В данной статье представлены краткая история протезирования, основные принципы биопротезирования, рассмотрены устройство, достоинства и недостатки бионических протезов. Биопротезирование способно значительно улучшить качество жизни человека, перенесшего ампутацию. К сожалению, высокотехнологическое протезирование пока мало распространено ввиду высокой стоимости, но развитие нанотехнологий и удешевление производства комплектующих позволят в ближайшем будущем сделать биопротезы более технологичными и доступными. Однако даже сейчас можно с уверенностью сказать, что функционал современных бионических протезов постоянно совершенствуется и обновляется.

Ключевые слова: биопротез, протез, биопротезирование, искусственная конечность, высокотехнологичный протез

## THE ORTHOTICS. IT'S HISTORY AND MODERNITY

Morozov A.M.<sup>1</sup>, Kadykov V.A.<sup>1</sup>, Lyubsky I.V.<sup>1</sup>, Askerov E.M.<sup>1</sup>, Pakhomov M.A.<sup>1</sup>,  
Gorodnichev K.I.<sup>1</sup>, Peltikhina O.V.<sup>1</sup>, Horak K.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FGBOU VO «Tver State Medical University Ministry of Health of Russia», Tver, e-mail: ammorozovv@gmail.com

According to statistics, about 12% of the world's population have impaired functions and structures of the body that impede physical activity, as well as impede social life and professional activity of a person. To adapt people who have undergone an amputation, it is necessary not only psychological assistance and rehabilitation physical therapy, but also the development of the most functional prosthesis that also meets the aesthetic requirements of modern man. The aim of our study was to assess the quality and possible functionality of modern bioprostheses, as well as to assess the prospects for their use in the existing conditions. A classical analysis of literary sources, both Russian and foreign, including those available on the Internet, was carried out. This article presents a brief history of prosthetics, the basic principles of bioprosthetics, the device, the advantages and disadvantages of bionic prostheses. Bioprosthetics can significantly improve the quality of life of a person who has undergone amputation. Unfortunately, high-tech prosthetics are still not very common due to the high cost, but the development of nanotechnologies and cheaper production of components will make bioprostheses more technological and affordable in the near future. However, even now we can say with confidence that the functionality of modern bionic prostheses is constantly being improved and updated.

Keywords: Bioprosthesis, prosthesis, bioprosthetics, artificial limb, high-tech prosthesis

В современном мире идет активное развитие технологий и роботизации производств, однако уровень травматизма сохраняется. Согласно статистике около 12% людей на планете [1] имеют нарушения структур организма, снижающие его функциональность, что в свою очередь отражается на уровне физической и социальной активности человека, снижает качество жизни и становится препятствием при реализации профессиональной деятельности. Более 50 миллионов человек каждый год приобретают инвалидность [2] по тем или иным

причинам, около 300 000 теряют ноги [3], а 390 тысяч – руки [4]. Утрата конечности не только приводит к физическим ограничениям, но также несет в себе и социальные проблемы для пострадавшего. Это все влияет на качество жизни человека.

Пытаясь уменьшить негативное влияние травмы, человечество изменяет инфраструктуру городов, адаптирует окружающую среду для лиц с ограниченными возможностями, а также прибегает к помощи искусственных конечностей – протезов. С развитием современных технологий выбором все чаще становятся биопротезы [5].

Биопротезы – это протезы конечностей, приводимые в движение миниатюрными блоками питания, которые способны реагировать на биотоки, возникающие в организме человека. Именно благодаря созданию биопротезов появилась возможность вернуть утраченные функции организма, будь то конечность или внутренний орган, и вернуть человека к полноценной социальной жизни.

Целью нашего исследования было оценить качество и возможный функционал современных биопротезов, а также оценить перспективы их использования в существующих условиях.

**Материалы и методы исследования.** Для компиляции основных фактов применялся классический метод анализа литературы. Изучался материал из актуальных публикаций, содержащих информацию по современным бионическим протезам и истории их создания, реализации таких устройств в настоящие дни, подробному внутреннему строению высокотехнологичных протезов, а также информацию об успешных применениях таких протезов. Поиск осуществлялся не только среди печатных источников, но также и в Интернете.

**Результаты исследования и их обсуждение.** *История протезирования.* Развитие протезирования имеет длинную историю – от примитивных механизмов до сложных современных конструкций. И для того, чтобы углубиться в изучение современных технологий, необходимо проследить их изменения в ходе истории человечества.

Истоки ортопедической техники идут из Древнего Египта. Древнеегипетские протезы производились из ткани и дерева, их главным предназначением было вовсе не заменить утраченную конечность, но своим видом создать у человека чувство цельности, полноценного вида в обществе. Это стремление позволило выполнить первый функциональный протез большого пальца ноги еще в период 950–710 гг. до н.э. Данное изобретение было обнаружено в 2001 г. на раскопках в Саккаре [6]. Протез состоял из двух деревянных частей, соединенных кожаной нитью через отверстия, просверленные в древесине. Палец закреплялся с помощью ремешка.

Однако деревянные протезы имели множество недостатков, поэтому мастера начали

поиск новых материалов. Так, в 1858 г. при раскопках в Италии был обнаружен первый металлический протез ноги, создание которого датируется 300 г. до н.э. Он был выполнен из бронзы и железа, с деревянным сердечником, располагающимся ниже колена. Такие протезы создавали лишь иллюзию новой конечности и по своей функциональности не позволяли вернуться к полноценной жизнедеятельности. Но на Апеннинском полуострове во времена Древнего Рима произошел один из известнейших случаев протезирования в Древнем мире. Ученым Плинием Старшим был описан уникальный железный протез правой руки, используемый генералом Марком Сергием [7]. Как командир он должен был держать свой щит и иметь возможность принимать участие в битвах, используя для этого железную руку.

Человечество развивалось, вместе с ним прогрессировало протезирование, давая начало все более сложным и модернизированным устройствам, поэтому в Средние века созданием искусственных конечностей занимались не только кузнецы, торговцы и оружейники как люди, преимущественно работавшие с металлами и деревом. Кроме них, развитию протезирования способствовали представители других профессий. Так, например, часовщики были особенно полезны для добавления сложных внутренних механических функций с помощью пружин и зубчатых колес. Тем не менее базовой функцией протезов оставалась эстетическая замена, служащая человеку сокрытием уродства или травмы.

Активному развитию протезов способствовала начавшаяся эпоха Ренессанса, когда открылись новые перспективы для искусства и философии и произошел резкий скачок развития в науке и медицине. В это время широкое распространение получило забытое, но ныне широко используемое протезирование зубов, а именно в отличие от более ранних приемов применения человеческих зубов их изготовление, которое осуществлялось преимущественно из таких материалов, как железо, сталь, медь и дерево.

Из этих материалов также изготавливались не только зубы, но и протезы других частей тела. В летописях находятся упоминания, датирующиеся 1508 г., о немецком наемнике Гетца фон Берлихингена, применяющем для жизни усовершенствованные железные руки, которые управлялись с помощью пружин, подвешенных на кожаных ремнях [8].

С развитием технологий и представления людей о должном внешнем виде протезы претерпевали множество изменений в своей эстетической и механической части. Несмотря на это, особенности их крепления и фиксации длительное время оставались без изменений, оставляя желать лучшего. Благодаря Питеру Вердайну в 1696 г. был разработан первый протез ноги ниже колена, не требующий дополнительной фиксации [7]. Именно эта модификация протеза голени позже станет основой для современных протезов. Кроме того, существующие протезы из железа и меди Густав Герман предложил заменить на

алюминиевые с целью сделать протез легче и функциональнее.

Но одного освоения технологий протезирования было недостаточно. Развитие медицины, а именно внедрение новых методов в область хирургии, позволило реализовать стремление максимально сохранить конечность, а также использовать меньший по размерам и весу протез, что привело к модернизации ампутации. Так, в 1843 г. Сэр Джеймс Сайм разработал способ ампутации лодыжки, не приводящий к удалению конечности до бедра [7]. Указанный подход приветствовался в сообществе инвалидов-ампутантов, так как это позволило ходить с протезом ступни, а не использовать целую искусственную ногу.

Таким образом, подводя итог развитию протезов в мировой истории, можно сказать, что они претерпевали существенные изменения. Искусственные конечности, от деревянных пальцев до механизированных устройств, дали возможность своим хозяевам не только чувствовать себя полноценными в обществе, но и частично позволили вернуть функции утраченного органа. Следует отметить, что некоторые протезы, созданные в прошлых веках, и по сей день являются основой для создания высокотехнологичных бионических протезов.

*Современный этап.* Дальнейший прогресс в протезировании произошел в конце XX и начале XXI вв. Создание новых классов биопротезов напрямую связано с развитием микроэлектроники, медицины, нейрофизиологии, в настоящее время является одной из приоритетных задач модернизации отечественного здравоохранения. На сегодняшний день современный бионический протез представляет собой электронно-механическое устройство, большая часть которого создается из пластика [9, 10]. Основными компонентами конструкции таких протезов являются каркас, механика и система управления.

Для создания каркаса широко используются поливинилхлориды, стеклопластики, жесткие и эластичные пенопласты [11], а также легкие металлические сплавы, благодаря чему обеспечиваются прочность и долговечность протеза. Существует множество видов пластика, которые обладают различной температурой плавления, повышенной прочностью или эластичностью и другими важными в протезировании факторами [12]. Другая функция каркаса – защита электронных систем от различных повреждений. Под каркасом находится аккумулятор, в зависимости от емкости которого заряда хватает на период от 3 до 7 дней. Протезы покрывают силиконовой или резиновой оболочкой для повышения эстетических качеств.

Для повышения удобства использования протеза и улучшения его мобильности применяют механические системы. Бионический протез имеет встроенные механизмы, которые делают устройство подвижным. Например, в искусственных ногах используются гидравлические, пружинные или даже пневматические амортизаторы, обеспечивающие смягчение и распределение ударной нагрузки при движении [8].

Для контроля над протезом в нем устанавливают датчики нервных сигналов [13] и обрабатывающий процессор, который осуществляет управление приводами. Такая сложная сеть датчиков, интегрированная в модуль, регистрирует изменения и позволяет вносить коррективы в свою работу, составляя систему управления протезом. Сегодня искусственные конечности уже имеют возможность программироваться так, чтобы принимать собственные решения с использованием камер и алгоритмов, однако о широком применении заявлять пока рано.

Для некоторых моделей ученые смогли разработать искусственный заменитель кожи, снабженный подобием рецепторов, благодаря которым протез способен «ощущать» прикосновения, определять их силу и передавать информацию к нервной системе [14, 15]. Такое усовершенствование позволило пациентам вновь испытывать проприоцептивные и тактильные ощущения.

До недавнего времени протезы крепились к телу пациента механически и не имели никакой связи с нервной системой. Любое движение в шарнирах-суставах требовало больших усилий, так как для его выполнения владельцу нужно было тем или иным образом регулировать поведение своего протеза, вручную обеспечивая обратную связь, совершая нефизиологичные движения мышц [16], что в свою очередь ограничивало набор выполнимых команд, поэтому мелкая моторика была практически невозможна. Теперь протезы рук обладают различным набором движений для повседневных задач, набором вариантов захвата и сжатия предметов. Управлять режимами работы данных протезов возможно посредством регистрации биопотенциалов нервных волокон, располагающихся в сохранившихся группах мышц конечностей, или же напрямую, считывания изменения электрических сигналов от головного мозга, а также при помощи специальной панели управления [17,18]. При желании пошевелить конечностью определенным образом возникает нервный импульс, который приводит к изменению электрического биопотенциала мышцы, что в свою очередь улавливается датчиками прибора.

Благодаря нейрофизиологическому принципу работы бионического протеза появилась возможность значительно упростить управление, а также частично вернуть пациенту ощущение обладания полноценной конечностью. При помощи бионических протезов человеку намного проще справляться с различными бытовыми действиями: пользоваться столовыми приборами, писать, работать за компьютером, завязывать шнурки, открывать бутылки, гладить белье, одеваться и многое другое [19].

Некоторые протезы позволяют активно заниматься спортом [20]. Для того чтобы начать пользоваться протезом и научиться правильно управлять им, нужна достаточная сила всех крупных и средних мышечных групп. Срок освоения протеза зависит от многих

факторов, таких как уровень соматического здоровья, двигательная активность, уровень ампутации, функционирование мышц туловища и конечностей, изменение объемных размеров культи и др.

Задача лечебной физкультуры при ампутации конечности заключается в адаптации к протезу, укреплении мышц таза и культи, обучении управлению протезом, тренировке координации движений, устранении контрактур усеченной конечности, укреплении мышц сохранившейся конечности, тренировке ориентации в пространстве.

Усовершенствование способов ампутации и развитие протезирования позволяют сократить сроки реабилитации людей. Ранняя ходьба на высокотехнологичном протезе позволяет больному быстрее адаптироваться к новым условиям жизни, а также способствует формированию нового двигательного стереотипа, оказывает положительное влияние на психическое состояние больного.

Как и ранее, биопротезы несут эстетическую функцию. Они устроены так, что при установке требуется минимальное инвазивное вмешательство и как следствие – незначительное количество инородных материалов в суставе, что также обеспечивает малую болезненность.

Более совершенная конструкция не требует дополнительных ремней для крепления, поэтому сосуды не сдавливаются и не нарушается трофика тканей культи, что обеспечивает их нормальную жизнедеятельность [21].

В основе управления биопротезов заложены принципы работы здоровой конечности, в чем заключается их физиологичность. Такое управление не требует от инвалида неестественных компенсаторных движений для осуществления захвата предмета.

Прогресс в развитии очевиден, и люди, потерявшие конечности, перестают чувствовать свою неполноценность, спрос на биопротезы с каждым днем только растет. Но сейчас существует постоянная потребность в улучшении бионических протезов, которые были бы способны восстановить полные двигательные функции и сенсорные способности утраченной конечности [22]. За последние 20 лет их создания и использования был выделен ряд недостатков, которые требуют ликвидации. К сожалению, имеющиеся модели рук и ног не способны развивать значительных усилий, а также работают недостаточно свободно и точно. Решить эту проблему можно за счет технологии искусственных мышц на основе углеродных трубок. Результаты многочисленных исследований показывают, что физические свойства материалов, изготовленных с применением нанотрубок, состоящих из атомов углерода, могут оказаться очень полезными в создании высокотехнологичных протезов. Благодаря уникальной структуре по своей работе они способны превосходить живые мышцы, а их способность чувствовать малейшие изменения давления позволяет

использовать их в качестве переключателей в компьютерных чипах и микросхемах.

Однако существует другая не менее значимая проблема: в протезах из-за опосредованности и «зашумленности» передаваемого сигнала наблюдается задержка в их работе, что ограничивает использование протезов в тех случаях, когда важна скорость реакции (например, при управлении транспортом). Для решения данной проблемы предлагается имплантировать датчики непосредственно в двигательные центры коры головного мозга [23].

Также широкому распространению бионических протезов препятствует их высокая цена. Стоимость искусственной конечности по-прежнему остается еще очень высокой и в зависимости от комплектации может составлять до 2,5 миллионов рублей, что ограничивает массовое внедрение и делает их не самыми доступными устройствами на данный момент.

В 2013 г. практически все части протеза были распечатаны на 3D-принтере, но и это не позволило сделать протезы доступными для всех, хотя существенно снизило их стоимость [24]. Наибольшее предпочтение сейчас отдается протезам, изготовленным с использованием сверхлегких материалов, таких как углепластик, титановые и алюминиевые сплавы [12].

**Выводы.** В настоящее время протезирование добилось заметного успеха. Биопротезирование способно значительно улучшить качество жизни человека, перенесшего ампутацию. Научные исследования в области биопротезирования не замедляют темпов, в дальнейшем можно будет ожидать, что протезы получат больший спектр возможностей, станут легкими, сильными, чувствительными, энергоемкими и максимально адаптированными к потребностям человека, чутко отвечающими всем его запросам. Также не исключено, что в скором времени появятся инновационные разработки с новыми возможностями, которые позволят бионическим протезам превосходить по своей функциональности естественные конечности.

На данный момент существует два основных направления по развитию бионических протезов. Во-первых, дать владельцу возможность почувствовать объект, к которому он прикасается, то есть сделать протез чувствительным. Во-вторых, избавиться от необходимости каждый раз снимать и надевать протез (при приеме душа или перед сном), то есть требуется вживление всех составных частей.

К сожалению, высокотехнологическое протезирование пока мало распространено ввиду высокой стоимости, наиболее известные случаи получения бионического протеза относятся к благотворительности частных организаций или общественному сбору средств. Однако государственные программы, нацеленные на развитие бионического протезирования, уже существуют.

На современном этапе развития протезирования человечество проявляет большой

интерес к данной технологии, а многие даже приветствуют ее внедрение, что свидетельствует о готовности социума принять данную ступень технологического прогресса в медицине. Кроме того, данный интерес демонстрирует, что общество активно готовится к внедрению искусственных органов и позитивной адаптации людей с инвалидностью.

### Список литературы

1. Оксенюк Д.Н., Черноус Д.А. Минимизация сил и моментов в биомеханической модели конечностей человека // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. 2014. № 8. С. 148-153.
2. Рубцов В.В., Васина Л.Г., Куравский Л.С., Соколов В.В. Модельный образец специальных образовательных условий для получения высшего образования студентами с инвалидностью: опыт создания и применения // Психологическая наука и образование. 2017. Т. 22. № 1. С. 34-49.
3. Литвинова Н.Ю., Черняк В.А., Панчук О.В., Плюта И.И. Роль дуплексной флоуметрии в оценке состояния тканей нижней конечности у пациентов с хронической ишемией нижних конечностей // Сердце и сосуды. 2014. № 3. С. 83-88.
4. Рудьковский Д.Н., Кан Д.В. Анализ рынка современных бионических протезов // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (Томск, 04-07 декабря 2017 г.). Томск: Издательство: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2017. С. 272-273.
5. Бушуева В.В., Губанов Н.Н., Губанов Н.И. Закономерности тройной детерминации научного творчества // Гуманитарный вестник. 2016. № 5 (43). С. 4. DOI: 10.18698/2306-8477-2016-5-362.
6. Москвитин С.К., Тюхтихов М.В., Алексеев А.А., Коренев Л.Е. Протезирование верхних конечностей тела // Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XVIII Международной научно-практической конференции (Пенза, 25 июня 2018 г.). Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2018. С. 121-124.
7. История имплантируемой техники. Протезы конечностей. 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/post/400695/>. (дата обращения: 03.06.2019).
8. Бионические протезы: история, принципы работы, последние достижения. 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://robo-sapiens.ru/stati/bionicheskie-protezyi/>. (дата обращения: 07.06.2019).
9. Агеева У.О., Агеева В.Г., Барский А.Б. Бионическое интеллектуальное протезирование

конечностей и логические нейронные сети // Информационные технологии. 2016. Т. 22. № 5. С. 379-386.

10. Борисова О.В., Борисов И.И., Кривошеев С.В., Резников С.С. Разработка механизма лучезапястного сустава антропоморфного протеза // Материалы XXVIII Международной инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2016) сборник трудов конференции. 2017. С. 216-218.

11. Энциклопедия полимеров / Под ред. Коллегия Кабанова В.А. (глав. ред.) Т. 2 М.: “Советская энциклопедия”, 1974. С. 928.

12. Березняк А.Е. Моделирование и прототипирование протеза верхней конечности // Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского (Москва, 17 февраля-01 марта 2017 г.). 2017. С. 110-111.

13. Скворчевский А.К. Разработка и исследование новых классов биопротезов и биороботов для реабилитации людей с ограниченными возможностями // Медицина и высокие технологии. 2015. № 1. С. 35-44.

14. Барабаш А. Ученые создали искусственную кожу, различающую прикосновения // Hi-News.ru. Новости высоких технологий. [Электронный ресурс]. URL: <https://hi-news.ru/technology/uchyonye-sozdali-iskusstvennuyu-kozhu-razlichayushhuyu-prikosnoveniya.html>. (дата обращения: 05.06.2019).

15. Завьялов С.А., Мейгал А.Ю. Технологии биоуправляемых протезов сегодня и завтра // Journal of biomedical technologies. 2015. № 2. С. 36-42.

16. Степаненко Д., По мановению мысли // Популярная механика 2016. № 2. С. 26-27.

17. Афонин А.Н., Алейников А.Ю., Гладышев А.Р., Попова А.В. Разработка и реализация макета бионического протеза кисти руки // Робототехника и техническая кибернетика. 2016. № 3 (12). С. 68-71.

18. Ахмерова У.Д., Чернышова Е.А., Морозов А.М. Бионические протезы, механизм обратной связи // Молодежь, наука, медицина: материалы 64-й Всероссийской межвузовской студенческой научной конференции с международным участием (Тверь, 19-20 апреля 2018 г.). Тверь: Издательство Тверского государственного медицинского университета. 2018. С. 103-107.

19. Губанов Н.И., Губанов Н.Н. Перспективы использования объективно-нереальных ситуаций // Вестник Ишимского государственного педагогического института им. П.П. Ершова. 2013. № 3 (9). С. 18-23.

20. Чернышова Е.А., Ахмерова У.Д., Пельтихина О.В., Морозов А.М. Применение протезов в параолимпийских видах спорта как фактор физической и психологической реабилитации // Инновации в медицине и фармации – 2018: материалы дистанционной

научно-практической конференции студентов и молодых ученых. Минск: Издательство Белорусского государственного медицинского университета. 2018. С. 492-494.

21. Большая Медицинская Энциклопедия (БМЭ) / Под ред. Петровского Б.В., 3-е издание. Том 21. С. 176.

22. Иванюк Н.М., Каримов В.Р., Будко Р.Ю., Гронский П.В., Клейман С.М. Способ и система управления интеллектуальной бионической конечностью // Патент РФ № 2635632. Патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью "Бионик Натали" (RU); заявлено 2016.12.14; опубликовано 2017.11.14 Бюл. № 32.

23. Левицкая О.С. Лебедев М.А. Интерфейс мозг-компьютер: будущее в настоящем // Вестник российского государственного медицинского университета. 2016. № 2. С. 4-16.

24. Замилацкий Ю.И., Курдыбайло С.Ф., Гайнуллина Р.Р., Чекушина Г.В. Технология протезирования, сокращающая время и трудозатраты на изготовление протезов верхних конечностей // 3-й Азиатско-Тихоокеанский конгресс по военной медицине: материалы конгресса (Санкт-Петербург, 08-12 августа 2016 г.). Санкт-Петербург: Издательство Военно-медицинской академии имени С.М.Кирова, 2016. С. 169-170.