

## Анализ методик моделирования внутренней поверхности приемных гильз протезов бедра по 3D-скану культы

### Аннотация

Создание позитива или приемной гильзы на основе 3D-скана культы бедра в позитив или приемную гильзу протеза является актуальной и нерешенной задачей протезирования при высоких ампутациях нижних конечностей. Широко применяемые методы подбора шаблонов позволяют повысить вероятность достижения положительного результата обеспечения техническим средством реабилитации. В статье рассмотрены практические аспекты построения внутренней поверхности приемной гильзы протеза бедра по индивидуальному 3D-скану культы бедра, даны рекомендации по применению.

### Введение

По данным Росстата на 1 января 2021г., в России более 11 млн. инвалидов. Ежегодно в России выдается более 550 тыс. протезов, в том числе эндопротезов и ортезов. В частности, до 95,7 % больных с последствиями заболеваний сосудов (облитерирующий атеросклероз, эндартериит, сахарный диабет) сталкиваются с ампутацией конечности на уровне бедра [1]-[6]. Одним из назначаемых техническим средством реабилитации является протез бедра. Модульность рассматриваемого типа протеза, замещающего стопу, голень и бедро (часть бедра), позволяет специалисту подобрать серийные узлы: стопу, несущий модуль, коленный узел и др. Протезы бедра в России в период 2019-2020 гг. составили более 47 % от общего количества протезов нижних конечностей, изготовленных за счет средств ФСС РФ и бюджетных средств, при этом более половины из них были модульной конструкции (рис. 1) [7].

Приемная гильза – это модуль, изготовленный по индивидуальным параметрам пациента, предназначенный для размещения в нем культы или пораженной конечности и обеспечивающий взаимодействие человека с протезом конечности. Основные функции приемной гильзы протеза бедра: размещение культы, сопряжение и удержание протеза на усеченной конечности, опора, передача движений и управление протезом при

ходьбе. При эксплуатации протеза приемная гильза обеспечивает дозированные нагрузки на ткани культы, компенсацию ударных нагрузок при минимизации поршневых движений культы в приемной полости гильзы, нормальное кровообращение в усеченной конечности.

Цифровая технология изготовления приемных гильз включает в себя этап компьютерного построения электронной геометрической модели внутренней поверхности приемной гильзы. Для этого используют преобразование электронной геометрической модели, полученной путем 3D-сканирования, или результаты обмера протезируемого пациента (периметры культы в сечениях, длины культы и сегментов здоровой конечности и др.) [8], [9]. Внутренняя поверхность приемной гильзы, в свою очередь, может быть преобразована в электронную геометрическую модель позитива – заготовки, используемой для изготовления (блоковки) приемных гильз по технологиям термовакуумного формования, заливки смол холодного отверждения и пр.

Модификацию формы внутренней поверхности в основном производят путем полигонального моделирования, NURBS-моделирования и анализа методом конечных элементов [10]-[13], которые не рассмотрены в этой статье (табл. 1). Полигональное моделирование – это один из видов трехмерного моделирования, позволяющий моделировать объект за счет соедине-

Таблица 1

Примеры САПР-моделирования внутренней поверхности приемной гильзы протеза

	Бесплатные САПР	Платные САПР (покупка, подписка)
Полигональное моделирование	«Meshmixer», «Autodesk Inc.», США	«Fusion360», «Autodesk Inc.», США
NURBS-моделирование	«Blender», «Blender Foundation», Нидерланды	«NEO», «rodin4D», Франция; «Rhino3D», «Robert McNeel & Associates», США

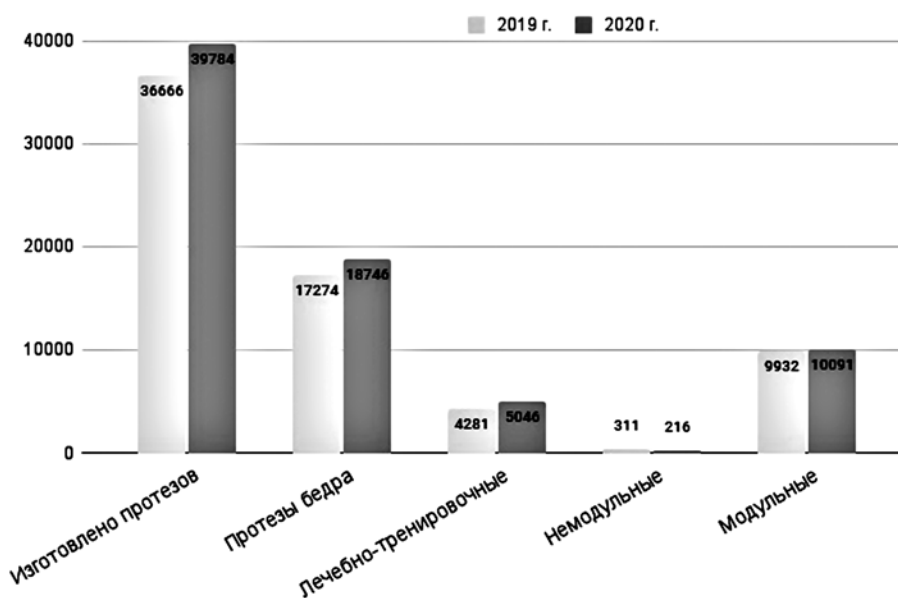


Рис. 1. Количество выданных протезов бедра в РФ по категориям за 2019 г. (левый столбец) и 2020 г. (правый столбец)

ния полигонов, которые состоят из вершин и ребер, создавая из них группы и формируя требуемый облик модели. NURBS-(Non-Uniform Rational B-Spline) моделирование – это технология неоднородных рациональных B-сплайнов, создания плавных форм и моделей, у которых нет острых краев, как у полигональных моделей.

Методики индивидуального моделирования, связанные с преобразованием 3D-скана, зависят от используемых САПР и заложенных в них инструментов. Основные методики:

- по полигональному 3D-скану культы;
- из шаблона с учетом формы культы;
- из позитива 3D-скана культы с учетом формы шаблона.

Анализ методик моделирования является неотъемлемым этапом разработки методического обеспечения для подготовки специалистов протезно-ортопедической отрасли к более широкому использованию цифровых технологий в практической работе.

## Цель

Определить практическую значимость методик моделирования приемных гильз протезов бедра.

## Материалы и методы

Проведено 3D-сканирование 21 пациента в возрасте от 11 до 86 лет с ампутационными дефектами бедра и гипсовых позитивов культей этих пациентов. При сканировании использовался 3D-сканер «iSense», компания «Occipital Structure Sensor» (США). Обработка полученных электронных геометрических моделей производилась в ПО «Meshmixer», «Autodesk Ink.» (США) и САПР «NEO», «rodin4D» (Франция).

Исходные данные: 3D-скан в формате .stl .obj .cprv, с текстурами или без, произвольно ориентированный. Этапы подготовки: ориентирование исходного 3D-скана, масштабирование, обрезка, устранение артефактов.

Базовый алгоритм реконструкции поверхности в полигональную модель, составленную из треугольников, – радиометрический метод получения электронной геометрической модели, при котором фоточувствительные элементы регистрируют излучение, отраженное от поверхности объекта. В исследовании применяли 3D-сканер с пространственным разрешением x/y на расстоянии 0,5 м...0,9 м и глубиной разрешения на расстоянии 0,5 м...1 мм. Вариативность объектов съемки (объектов) предоставляет возможность использования различных методик 3D-сканирования, при этом ряд пациентов прошли 3D-сканирование, но не включались в исследование.

При культе бедра производят следующую модификацию 3D-скана: разгружают область промежности, лонную кость, костный опил, большой вертел бедренной кости. Нагрузку моделируют в следующих областях: подвертельная и надвертельная латеральные поверхности бедра, седалищный бугор.

В ходе исследования анализировали три методики моделирования.

1. Приемная гильза по полигональному 3D-скану культы (рис. 2). Объект модификации: 3D-скан культы. Преимущества: максимальная степень индивидуализации, достаточно низкий порог вхождения (основные используемые инструменты – «добавить»/«убрать»), доступность бесплатных программ и обучающих видео. Недостатки: длительность процесса модифи-

кации, придание финишной формы (локальное и полное сглаживание без изменения размеров формы) соответствует времени модификации 3D-скана.

2. Приемная гильза из шаблона с учетом формы культы (рис. 3а). Объект модификации: 3D-модель шаблона. Особенности методики: подбор коронки (формы посадочного кольца) на пациенте, модификация «поверхности». Преимущества: уменьшается человеческий фактор при обработке скана культы (есть готовое посадочное кольцо), доступность бесплатных программ и обучающих видео, сокращение времени моделирования. Недостатки: необходима библиотека цифровых моделей коронок, необходима точность при ориентировании коронки на культе.

3. Приемная гильза из позитива 3D-скана культы с учетом формы коронки (рис. 3б, в). Объект модификации: 3D-скан культы. Преимущества: более «привычное» отображение объекта моделирования, формирование шаблонов модификаций. Недостатки: необходима библиотека цифровых моделей коронок, ошибки в позиционировании + человеческий фактор.

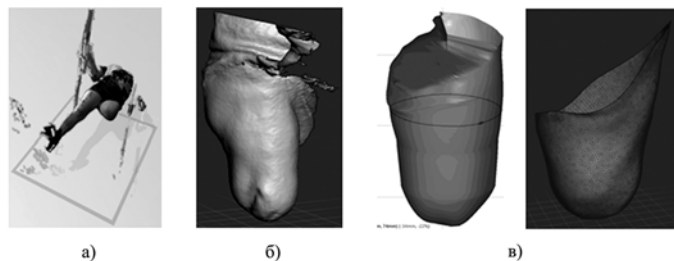


Рис. 2. Внутренняя поверхность приемной гильзы по полигональному 3D-скану культы: а) протез бедра; б) электронная геометрическая модель после 3D-сканирования; в) электронная геометрическая модель после модификации

## Результаты

Рассмотренные методики сравнивались по предложенным критериям (табл. 2). Методика 1 наиболее удобна для протезируемого, но наименее точна, является наиболее длительным методом моделирования, что влияет на срок достижения результата протезирования. Методика 2 требует примерки коронки на культю, что увеличивает длительность сбора данных, но удобна для специалиста. Методика 3 аккумулирует преимущества, но требует высокого опыта протезиста при виртуальном ориентировании коронки на культе.

## Выводы

Рассмотренные методики реализуют подходы «пациент-культя-скан-приемная гильза-протез» и «пациент-культя-скан-шаблон-приемная гильза-протез».

Использование специализированных платных САПР предоставляет специалистам больше инструментов для решения основных проблем моделирования: искажение масштаба и формы объекта «на экране», недостаточность инструментов обратной связи.

Накопление опыта применения методик позволит сформировать направление алгоритмизации построения приемных гильз протезов бедра.

Таблица 2

Анализ рассмотренных методик

Критерий сравнения	Методика 1: приемная гильза по полигональному 3D-скану культы	Методика 2: приемная гильза из коронки с учетом формы культы	Методика 3: приемная гильза из 3D-скана культы с учетом формы коронки
Комфорт для пациента	+	±	+
Время моделирования	1 день	3 ч	1-2 дня, далее 5 ч на основе созданного шаблона
Рекомендации для использования в цифровой технологии	Изготовление позитива, его доработка	3D-печать приемной гильзы, изготовление позитива	3D-печать приемной гильзы, изготовление позитива

Список литературы:

1. Золоев Г.К. Облитерирующие заболевания артерий. Хирургическое лечение и реабилитация больных с утратой конечности. Монография / 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Литтерра, 2015. 480 с. С. 17-37.
2. Курдыбайло С.Ф., Широков П.С., Герасимова Г.В., Суляев В.Г. Ампутации нижних конечностей и динамика инвалидности в Санкт-Петербурге // АФК. 2012. № 1 (49). С. 18-20.
3. Покровский А.В., Ивандаев А.С. Состояние сосудистой хирургии в России в 2016 году / Российское общество ангиологов и сосудистых хирургов. – М., 2017 / <http://www.angiolsurgery.org/society/situation/2016/>.
4. Харазов А.Ф., Каляев А.О., Исаев А.А. Распространенность симптомной ишемии нижних конечностей в Российской Федерации // Хирургия. 2016. № 7. С. 58-61.
5. Официальный сайт Федерального государственного бюджетного учреждения «Центральный научно-исследовательский институт организации и информатизации здравоохранения» Министерства здравоохранения Российской Федерации / <https://mednet.ru/> (дата обращения: 04.06.2019).
6. Заболеваемость взрослого населения России в 2016 году. Статистические материалы. Часть III / Департамент мониторинга, анализа и стратегического развития здравоохранения Министерства здравоохранения Российской Федерации, ФГБУ «Центральный научно-исследовательский институт организации и информатизации здравоохранения» Министерства здравоохранения Российской Федерации. – М., 2017.
7. Головин М.А., Николаев В.Ф., Казаков В.П., Гоголев Е.А., Суляев В.Г., Воронин И.А. Анализ структуры обеспечения протезно-ортопедическими изделиями в России за период 2019-2020 гг. (до и во время эпидемических ограничений) // Физическая и реабилитационная медицина. 2022. Т. 4. № 2. С. 8-20.
8. Ng P., Lee P.S.V., Goh J.C.H. Prosthetic sockets fabrication using rapid prototyping technology // Rapid Prototyp. J. 2002. № 8 (1). PP. 53-59.
9. Tay F.E.H., Manna M.A., Liu L.X. A CAD/CAM method for prosthetic socket fabrication using the FDM technology // Rapid Prototyp. J. 2002. № 8 (4). PP. 258-262.
10. Facchetti G., Gabbiadini S., Colombo G., Rizzi C. Knowledge-based System for Guided Modeling of Sockets for Lower Limb Prostheses // Computer-Aided Design & Applications. 2010. № 7 (5). PP. 723-737.
11. Aydin A.C., Atiç R., Aydin Z., Alemdar C., Karakoç M., Nas K., Em S. Effects of the use of conventional versus cad/cam sockets on clinical characteristics and quality of life of transfemoral amputees // Journal of Clinical and Analytical Medicine. 2018. № 10.
12. Abbas S.M. Fatigue Characteristics and Numerical Modeling Socket for Patient with Above Knee Prosthesis // Defect and Diffusion Forum. 2020. Vol. 398. PP. 76-82.
13. Sundararaj S., Subramaniyan G.V. Structural design and economic analysis of prosthetic leg for below and above knee amputation // Materials Today: Proceedings. 2021. № 37. PP. 3450-3460.

Марина Владимировна Черникова,  
руководитель отдела,  
Михаил Андреевич Головин,  
руководитель отдела,  
Владимир Михайлович Янковский,  
канд. мед. наук, ст. научный сотрудник,  
ФГБУ «ФНЦРИ им. Г.А. Альбрехта» Минтруда России,  
Константин Константинович Щербина,  
д-р мед. наук, директор,  
Институт протезирования и ортезирования,  
ФГБУ «ФНЦРИ им. Г.А. Альбрехта» Минтруда России,  
Евгений Андреевич Гоголев,  
врач травматолог-ортопед,  
мл. научный сотрудник,  
ФГБУ «ФНЦРИ им. Г.А. Альбрехта» Минтруда России,  
г. С.-Петербург,  
e-mail: golovin@center-albreht.ru

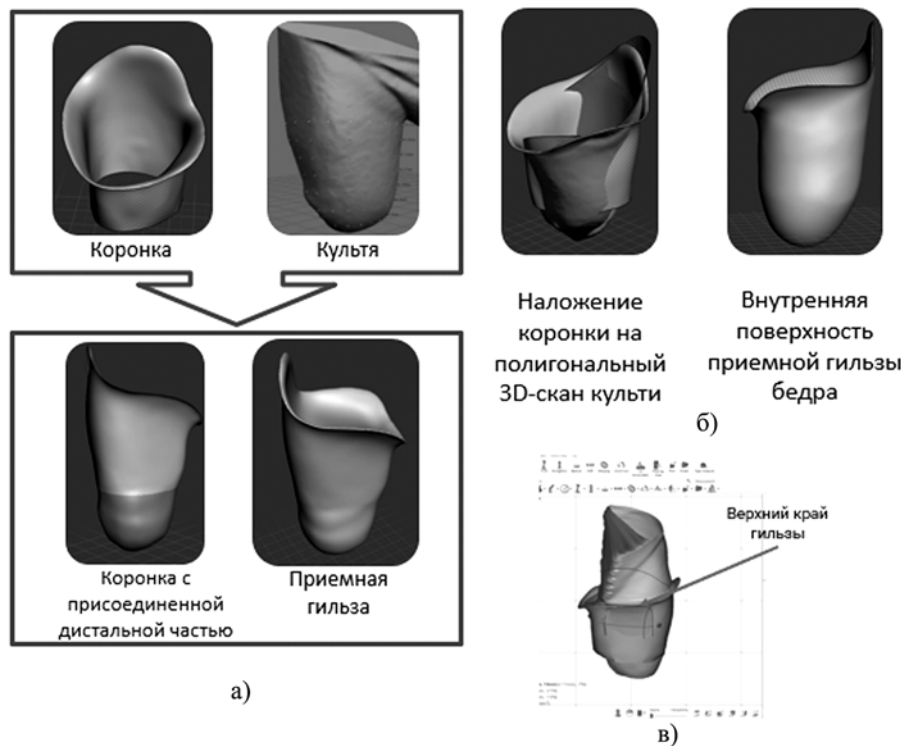


Рис. 3. Методики моделирования: а) приемная гильза из коронки с учетом формы культи; б, в) приемная гильза из позитива 3D-скана культи с учетом формы коронки