

ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТ-АССИСТИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ПРИ ПЕРВИЧНОМ ЭНДОПРОТЕЗИРОВАНИИ ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА

Г. Дгебуадзе^{1*}, А.А. Шумский¹, С.В. Крылов^{1,2}, А.К. Орлецкий¹

¹ ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Пирогова» Минздрава России, Москва

² ФГБУ ДПО «Центральная государственная медицинская академия» Управления делами Президента РФ, Москва

ROBOT-ASSISTED TECHNIQUES IN PRIMARY HIP REPLACEMENT

G. Dgebuadze^{1*}, A.A. Shumsky¹, S.V. Krylov^{1,2}, A.K. Orletsky¹

¹ Pirogov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia

² Central State Medical Academy of Department of Presidential Affairs, Moscow, Russia

*E-mail: mr.dgebuadze777@mail.ru

Аннотация

Роботизированное эндопротезирование суставов рассматривается в настоящее время как перспективное направление развития ортопедии. При этом имеется ряд ограничений к широкому внедрению данной технологии на современном этапе развития медицинской науки и практики. **Цель** – проанализировать современное состояние и перспективы развития робот-ассистированных методов, используемых при первичном эндопротезировании тазобедренного сустава на современном этапе, их преимущества и недостатки. **Материалы и методы.** По ключевым словам был выполнен поиск литературы в электронных базах данных Pubmed, Web of Science, eLibrary, Google Scholar. Особое внимание авторами уделялось перспективам использования роботизированных систем в эндопротезировании тазобедренного сустава. **Результаты.** Определена несомненная перспективность использования робот-ассистированных методов в первичном протезировании тазобедренного сустава. Охарактеризованы основные перспективные направления по развитию исследований и технологий в данной отрасли медицинской науки. **Заключение.** Использование робот-ассистированных методов при протезировании тазобедренного сустава позволяет сократить время операции, снизить интенсивность и длительность послеоперационной боли, а также улучшить показатели функционального восстановления до начала самостоятельной ходьбы, что способствует раннему послеоперационному клиническому восстановлению. Основная проблема широкого внедрения робот-ассистированных методов при протезировании тазобедренного сустава, в свою очередь, заключается в высокой стоимости и длительности процедуры.

Ключевые слова: робот-ассистированные методы, первичное эндопротезирование, тазобедренный сустав, роботическая хирургия.

Abstract

Background. Robot-assisted joint replacement is currently considered a promising direction in orthopedics. At the same time, there is a number of points which limit the widespread implementation of this technology in medical science and practice. **Purpose.** To analyze the current state and prospects of robot-assisted technologies used in the primary hip replacement, as well as to define their advantages and disadvantages. **Materials and methods.** A literature search was done in the electronic databases Pubmed, Web of Science, e-Library, and Google Scholar, using keywords. The authors paid a specific attention to the prospects of robotic systems in hip replacement in future. **Results.** It is undoubtedly clear now that robot-assisted techniques is a reasonable option in the primary hip replacement. The authors characterized basic promising directions for research in this branch of medical science. **Conclusion.** Robot-assisted techniques applied in hip replacement can reduce surgical time, intensity and duration of postoperative pain, as well as they can improve functional recovery before the patient starts walking independently. As a result, we can see an early postoperative clinical recovery. The main obstacle in more active spreading robot-assisted technologies is their high cost and long duration of the procedure.

Keywords: robot-assisted methods, primary arthroplasty, hip joint, robotic surgery.

Ссылка для цитирования: Дгебуадзе Г., Шумский А.А., Крылов С.В., Орлецкий А.К. Применение робот-ассистированных методов при первичном эндопротезировании тазобедренного сустава. *Кремлевская медицина. Клинический вестник.* 2024; 2: 88–92.

Введение

Как междисциплинарное направление, цифровая интеллектуальная ортопедия представляет собой третью волну развития технологий в области ортопедии [1, 2]. Роботизированное эндопротезирование суставов связано с повышением показателей успеха операции, сокращением предоперацион-

ного плана и продолжительности операции, более точным выравниванием, правильным расположением компонентов, более коротким пребыванием в больнице, меньшим кровотечением, более низкой частотой осложнений и улучшением удовлетворенности пациентов по сравнению с традиционными методами [3, 4]. Роботизированное протезирование суставов

в настоящее время является одним из наиболее перспективных направлений развития науки и клинической практики [5, 6].

Цель исследования – проанализировать современное состояние и перспективы развития робот-ассистированных методов, используемых при первичном эндопротезировании тазобедренного сустава на современном этапе, их преимущества и недостатки.

Материалы и методы

Обзор проводили в соответствии с требованиями к рецензируемым элементам отчетности Соглашения о систематическом обзоре и метаанализе Prisma. Был выполнен поиск литературы в электронных базах данных Pubmed, Web of Science, eLibrary, Google Scholar по следующим ключевым словам: «робот-ассистированные методы», «первичное эндопротезирование», «тазобедренный сустав», «роботическая хирургия», robot-assisted methods, primary endoprosthesis, hip joint, robotic surgery. Два исследователя независимо друг от друга просматривали аннотации статей в соответствии с необходимыми критериями отбора, после чего анализировали обзорные статьи и ссылки на все найденные публикации с целью изучения других потенциально релевантных материалов.

Критерии включения публикаций в обзор:

- 1) публикации представляли собой рандомизированные контролируемые исследования или обсервационные исследования;
- 2) наличие нескольких ключевых слов в одной публикации;
- 3) в случае дублирования информации или при повторном упоминании одной и той же информации для данного обзора использовали данные из последней по времени опубликованной статьи.

Критерии исключения публикаций из обзора:

- 1) статьи, не основанные на оригинальных исследованиях;
- 2) несоответствие поисковым запросам;
- 3) отсутствие полного текста статьи в свободном доступе.

Всего в обзор было включено 46 публикаций, при этом особое внимание было уделено анализу перспектив использования роботизированных систем в эндопротезировании тазобедренного сустава.

Результаты и обсуждение

Роботизированные системы подразделяются на две основные категории:

- 1) тактильные – проводимые хирургом с использованием роботизированной техники как вспомогательного элемента;
- 2) активные, или автономные, системы, которые следуют полному предоперационному плану, а сама операция проводится без вмешательства хирурга [7].

В последние годы в клинической практике используются роботизированные системы для хирургии суставов, в том числе роботизированная система Mako (Stryker, США), роботизированная система Navio (Xerox, Великобритания), роботизированная система Rosa (Jiema, США) и система VELYS (Johnson & Johnson, США). Системы, которые прошли клинические испытания, включают следующие роботизированные системы: систему Bone Shengyuanhua (Bone Shengyuanhua Robot, Shenzhen), ортопедическую хирургическую роботизированную систему Tianyu (Beijing Tianzhihang Medical Technology), систему Bone Shengyuanhua Robot, Shenzhen, систему ортопедической хирургии Beijing Tianzhihang Medical Technology, систему Suzhou Minimally Invasive Changxing Robot, роботизированную систему Jianjia

(Hangzhou Jianjia Robot), систему Hehua Ruibo (Beijing Hehua Ruibo Technology) и др. [6].

В настоящее время мейнстримом для эндопротезирования суставов стала полуактивная конструкция роботизированной системы благодаря следующим преимуществам:

- 1) более полная система планирования операции, в том числе предоперационное планирование и планирование интраоперационной коррективы;
- 2) вспомогательная навигационная система, позволяющая отслеживать относительное положение роботизированной руки и пациента, а также взаимодействовать с роботизированной рукой для выполнения точных хирургических операций;
- 3) роботизированная рука с функцией тактильной обратной связи с помощью навигации для достижения точности операции, включая остеотомию, шлифование, и обеспечение безопасной зоны для работы роботизированной руки с целью повышения точности и снижения риска сопутствующих травм и осложнений;
- 4) возможность настройки угла установки протеза, контроля длины конечности, баланса мягких тканей [6].

Эволюция ортопедической хирургии позволила усовершенствовать планирование операций, точную роботизированную обработку кости, улучшить контакт имплантата с костью, оптимизировать размещение имплантата и механическое выравнивание. Потенциальные преимущества роботизированной хирургии включают в себя улучшение операционного процесса, повышение эффективности и сокращение хирургического времени [8–10].

Как и во всех новых технологиях, главной проблемой роботизированной хирургии является первоначальная инвестиционная стоимость. Дорогостоящее оборудование роботизированных систем является одним из основных препятствий, ограничивающих их широкое применение сейчас и в будущем. Стоимость роботизированной системы варьирует от 400 000 долл. США для хирургической системы Navio (Smith and Nephew, Питтсбург, Пенсильвания, США) до 700 000 долл. США для системы Mako Rio, а для усовершенствованной роботизированной хирургической системы da Vinci (Intuitive Surgical Inc., Саннивейл, Калифорния, США) она может достигать 2,8 млн долл. США. Кроме того, для каждой процедуры стоимость расходных материалов увеличивается до 2000 долл. США, а ежегодная плата за обслуживание роботов – до 173 000 долл. США. В то же время стоит отметить, что в среднем на обучение врача в США уходит 11 лет стоимостью не менее 208 000 долл. США [11]. Кроме того, роботизированная хирургия способствует устранению логистических затрат, таких как транспортировка, повторная стерилизация и хранение инструментов, которые используются в операционной во время обычного эндопротезирования суставов. При использовании роботизированной хирургии увеличиваются рабочий процесс и производительность труда, что экономически выгодно для центров, практикующих однокомпонентное эндопротезирование коленного сустава с объемом ≥ 94 случаев в год: при более чем 94 случаях роботизированной замены мениска эффективность обычной инструментальной хирургии [12]. В целом экономическая эффективность роботизированной хирургии напрямую связана со стоимостью робота (в том числе стоимостью его эксплуатации и требуемых расходных материалов), стоимостью самой операции и потенциальными преимуществами роботизированной хирургии, которые должны включать возможности сокращения сроков госпитализации и риска послеоперационных осложнений [13, 14].

Данные о долгосрочных результатах практического применения роботизированных систем, которые в последнее время считаются довольно перспективными, с теоретической точки зрения довольно ограничены. Сообщается, что частота сбоев в работе хирургических роботов во время операции составляет от 0.4 до 4.6% [11]. Для таких непредвиденных ситуаций в операционной всегда доступны как хирург, так и традиционные инструменты. Несомненна возможность оптимизации эндопротезирования тазобедренного сустава путем роботизированных технологий относительно первичной артропластики. В то же время остаются актуальными проблемы высокой стоимости роботизированных технологий и необходимости длительной предоперационной подготовки, облучения пациента более высокими уровнями радиации по сравнению со стандартной радиологией, а также вопросы, касающиеся выбора шрифтов, используемых для обеспечения выравнивания [15–19].

Современные роботизированные системы являются вспомогательным компонентом при проведении эндопротезирования суставов для обеспечения более высокой точности манипуляций хирурга [20, 21]. Роботизированные системы позволяют достичь наиболее точного расположения и угла протеза, более высокой точности позиционирования компонентов, что обеспечивает скорейшее восстановление подвижности сустава [22, 23]. В 2020 г. было установлено, что роботизированная операция превосходит обычную инструментальную артропластику благодаря лучшей визуализации, а процесс восстановления силовой линии после роботизированной операции является более эффективным и быстрым [24, 25]. Поскольку при артропластике предоперационное планирование роботизированной системы является более комплексным, а интраоперационная методика более точной, минимизируется воздействие на мягкие ткани [26]. При эндопротезировании тазобедренного сустава угол разгибания и угол наклона вперед вертлужного протеза, установленного с помощью робота, также являются более точными в сравнении с эндопротезированием коленного сустава традиционными методами [27]. Показатели послеоперационной визуализации близки к значению предоперационного планирования или интраоперационных измерений [28, 29], а восстановление длины и эксцентриситета нижней конечности эффективнее [30].

Несмотря на то что роботизированная хирургия существует уже более трех десятилетий, робот-ассистированные методы эндопротезирования суставов нуждаются в значительном усовершенствовании. Кроме того, интраоперационное размещение и отладка машин, установка навигационных и позиционирующих устройств, регистрация и выравнивание и многие другие процессы занимают продолжительное время, поэтому представляется целесообразным расширять междисциплинарное сотрудничество и идти по пути медико-промышленной интеграции, чтобы преодолеть эти недостатки или ограничения [6, 31].

Существует определенный консенсус относительно преимуществ роботизированной артропластики с точки зрения точности установки протеза, но степень преимущества ее клинической пользы все еще находится в стадии обсуждения [32]. Роботизированная артропластика позволяет снизить повреждение тканей, уровень воспалительных факторов, ускорить послеоперационную реабилитацию, уменьшить болевые ощущения, что способствует лучшему восстановлению подвижности суставов, а также сокращению времени госпитализации [33]. Вероятно, это зависит от квалификации практикующего

врача, а также от вида используемой роботизированной системы, метода оценки и момента наблюдения.

Другим показателем для оценки эффективности роботизированной хирургии суставов является срок службы протеза. Из-за недостаточного времени его клинического применения число случаев со средне- и долгосрочными результатами наблюдения относительно невелико, что затрудняет получение достоверных данных. Тем не менее традиционный активный робот Robodoc применяется в клинической практике уже более 10 лет. Использование нового поколения полуавтоматических роботизированных операций по замене суставов позволило добиться хорошей краткосрочной выживаемости протезов [34], но средне- и долгосрочные результаты еще предстоит оценить.

Еще один вопрос, требующий решения, – обучение робота выполнению конкретных манипуляций при замене суставов. Это объемный процесс, который несложно освоить на практике. Взяв в качестве примера роботизированную операцию по замене тазобедренного сустава, J.M. Redmond и соавт. [35] выявили, что для обучения робота необходимо от 14 до 35 случаев [36]. Считается, что для изучения расположения вертлужной впадины требуется 12 случаев и только семь случаев необходимы для ознакомления с хирургическим процессом [37, 38].

Для создания текущего классического плана роботизированной хирургии требуется предоперационное обследование с помощью соответствующих методов высокоточной визуализации (компьютерной томографии или рентгена) с целью создания анатомического силуэта пациента, определения позиционирования робота и разработки плана периоперационных мероприятий [39, 40]. Другим типом робота для эндопротезирования суставов является система, не зависящая от визуализации, а план операции при ее использовании разрабатывается на основе включения анатомических признаков и данных кинематики сустава. Однако компромисс между зависимостью от изображения и точностью в настоящее время не убедителен. С точки зрения клинического применения в дополнение к поддержанию точности силовых линий и костной массы больше внимания следует уделять роли роботизированных систем в улучшении баланса мягких тканей и достижении лучшего динамического выравнивания. Следует обратить внимание на сочетание активной и пассивной эксплуатации с учетом точности, безопасности и эффективности управления. Кроме того, при эндопротезировании тазобедренного сустава в настоящее время основное внимание уделяется предоперационному плану с учетом индивидуальных анатомических особенностей и взаимосвязи позвоночника и таза, персонализации и оптимизации угла установки и положения протеза, уменьшению осложнений, повышению эффективности и срока службы протеза [41–44].

С помощью роботизированного эндопротезирования суставов возможно не только обеспечить трехмерное визуальное предоперационное планирование, но и создать точный предоперационный план. Современные роботы для эндопротезирования суставов не могут выполнять автоматическое персонализированное планирование перед операцией, а также имеют недостатки низкой эффективности, высокой стоимости и т.д. Однако, основываясь на их текущей производительности и с помощью искусственного интеллекта, разработки более совершенных алгоритмов, эндопротезирование суставов будет все более и более точным, интеллектуальным и минимально инвазивным, что является неизбежной тенденцией в развитии хирургии суставов [45]. Будущие роботизированные системы также должны значительно повысить уровень программного

обеспечения, искусственного интеллекта, возможности сбора и анализа данных системы, интегрировать анатомические и физиологические характеристики пациентов, конструкцию протезов и хирургические технологии на более высоком уровне, а также использовать преимущества оцифровки и интеллекта системы для достижения успеха в выборе протезов и хирургической стратегии [46].

Заключение

Роботизированная хирургия уже является частью естественной и логичной эволюции минимально инвазивной хирургии и широко распространяется по всему миру, поскольку преодолевает ограничения традиционной лапароскопии благодаря высокому разрешению, трехмерному стереоскопическому зрению и увеличению изображения, а также стабильной и управляемой хирургом камере с улучшенной эргономикой и увеличенным диапазоном движения.

Сложности широкого внедрения процедур, проводимых с роботизированной поддержкой, в первую очередь связаны с их стоимостью и увеличением времени работы. Подобно любым предыдущим инновациям или технологическим разработкам, которые изначально считались недоступными, в будущем они станут экономически эффективными.

В целом при роботизированной артропластике тазобедренного сустава сокращается время операции и уменьшаются интенсивность и длительность послеоперационной боли, а также сокращается период до начала самостоятельной ходьбы, что способствует раннему послеоперационному клиническому восстановлению.

Литература

1. Picard F. et al. Computer assisted orthopaedic surgery: past, present and future // *Medical engineering & physics*. – 2019. – V. 72. – P. 55–65. DOI: 10.1016/j.medengphy.2019.08.005.
2. Radermacher K. et al. Computer-assisted orthopedic surgery // *Biomedizinische Technik / Biomedical Engineering*. – 2012. – V. 57. – No 4. – P. 207. DOI: 10.1515/bmt-2012-0401.
3. Burger J.A. et al. Mid-term survivorship and patient-reported outcomes of robotic-arm assisted partial knee arthroplasty: A single-surgeon study of 1018 knees // *The Bone & Joint Journal*. – 2020. – V. 102. – No 1. – P. 108–116.
4. Domb B.G. et al. Minimum 5-year outcomes of ROBOTIC-ASSISTED primary total hip arthroplasty with a nested comparison against manual primary total hip arthroplasty: a propensity score-matched study // *JAAOS. Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*. – 2020. – V. 28. – No 20. – P. 847–856.
5. Шестерня Н.А. и др. Эндопротезирование тазобедренного сустава в сложных случаях // *Кафедра травматологии и ортопедии*. – 2016. – № 1. – С. 30–35. [Shesternya N.A. et al. Hip replacement in complex cases // *Department of Traumatology and Orthopedics (Kafedra travmatologii i ortopedii)*. – 2016. – No 1. – P. 30–35. In Russian].
6. Fu J. et al. Robot-assisted joint arthroplasty-An emerging technology of the present and the future // *Zhongguo Xiufu Chongjian Waike Zazhi (Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery)*. – 2021. – V. 35. – No 10. – P. 1217–1220. DOI: 10.7507/1002-1892.202106086.
7. Jahng K.H. et al. Minimally invasive surgery in orthopedics. – Springer, 2015. – P. 1–15.
8. Nakamura N. et al. Does robotic milling for stem implantation in cementless THA result in improved outcomes scores or survivorship compared with hand rasping? Results of a randomized trial at 10 years // *Clinical orthopaedics and related research*. – 2018. – V. 476. – No 11. – P. 2169. DOI: 10.1097/CORR.0000000000000467.
9. Negrín R. et al. Robotic-assisted surgery in medial unicompartamental knee arthroplasty: does it improve the precision of the surgery and its clinical outcomes? Systematic review // *Journal of Robotic Surgery*. – 2021. – V. 15. – No 2. – P. 165–177.
10. Parsley B.S. Robotics in orthopedics: a brave new world // *The Journal of arthroplasty*. – 2018. – V. 33. – No 8. – P. 2355–2357. DOI: 10.1016/j.arth.2018.02.032.
11. Beyaz S. A brief history of artificial intelligence and robotic surgery in orthopedics & traumatology and future expectations // *Joint Diseases and Related Surgery*. – 2020. – V. 31. – No 3. – P. 653. DOI: 10.5606/ehc.2020.75300.
12. Moschetti W.E. et al. Can robot-assisted unicompartamental knee arthroplasty be cost-effective? A Markov decision analysis // *The Journal of Arthroplasty*. – 2016. – V. 31. – No 4. – P. 759–765. DOI: 10.1016/j.arth.2015.10.018.
13. Пиманчев О.В. и др. Эндопротезирование тазобедренного сустава с использованием роботизированной системы // *Вестник Национального медико-хирургического центра им. Н.И. Пирогова*. – 2022. – Т. 17. – № 2. – С. 125–128. [Pimanchev O.V. et al. Hip replacement using a robotic system // *Bulletin of the National Medical and Surgical Center named after N.I. Pirogov*. – 2022. – V. 17. – No 2. – P. 125–128. In Russian]. DOI: 10.25881/20728255_2022_17_2_125.
14. Vermue H. et al. Can robot-assisted total knee arthroplasty be a cost-effective procedure? A Markov decision analysis // *The Knee*. – 2021. – V. 29. – P. 345–352. DOI: 10.1016/j.knee.2021.02.004.
15. Zhu B. et al. Combined anteversion technique in total hip arthroplasty for Crowe IV developmental dysplasia of the hip // *Hip International*. – 2017. – V. 27. – No 6. – P. 589–594.
16. Рукин Я.А. и др. Ранние результаты эндопротезирования тазобедренного сустава с применением индивидуальных аугментов при диспластическом коксартрозе // *Травматология и ортопедия России*. – 2020. – Т. 26. – № 2. – С. 50–59. [Rukin Ya.A. et al. Early results of hip arthroplasty using individual augments for dysplastic coxarthrosis // *Traumatology and orthopedics in Russia (Travmatologiya i ortopediya Rossii)*. – 2020. – V. 26. No 2. – P. 50–59. In Russian].
17. Hepinstall M. et al. Robotic-assisted total hip arthroplasty in patients who have developmental hip dysplasia // *Surgical Technology International*. – 2021. – V. 39. – P. 338–347. DOI: 10.52198/21.STI.39.OS1454.
18. Vigdorchik J.M. et al. The use of robotic-assisted total hip arthroplasty in developmental dysplasia of the hip // *Arthroplasty Today*. – 2020. – V. 6. – No 4. – P. 770–776. DOI: 10.1016/j.artd.2020.07.022.
19. Wang L. et al. Does preoperative rehabilitation for patients planning to undergo joint replacement surgery improve outcomes? A systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials // *BMJ Open*. – 2016. – V. 6. – No 2. DOI: 10.1136/bmjopen-2015-009857.
20. Bendich I. et al. Robotic assistance for posterior approach total hip arthroplasty is associated with lower risk of revision

- for dislocation when compared to manual techniques // *The Journal of Arthroplasty*. – 2022. – V. 37. – No 6. – P. 1124–1129. DOI: 10.1016/j.arth.2022.01.085.
21. Cozzi Lepri A. et al. Precision and accuracy of robot-assisted technology with simplified express femoral workflow in measuring leg length and offset in total hip arthroplasty. – 2020. – V. 16. – No. 5. – P. 1–6. DOI: 10.1002/rcs.2141.
 22. Jacofsky D.J. et al. Robotics in arthroplasty: a comprehensive review // *The Journal of Arthroplasty*. – 2016. – V. 31. – No 10. – P. 2353–2363. DOI: 10.1016/j.arth.2016.05.026.
 23. Batailler C. et al. Improved implant position and lower revision rate with robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty // *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. – 2019. – V. 27. – P. 1232–1240. DOI: 10.1007/s00167-018-5081-5.
 24. Agarwal N. et al. Clinical and radiological outcomes in robotic-assisted total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis // *The Journal of Arthroplasty*. – 2020. – V. 35. – No 11. – P. 3393–3409. e2. DOI: 10.1016/j.arth.2020.03.005.
 25. Haniball J. et al. Robotic-assisted acetabular cup placement in severe intrapelvic acetabular protrusion: a case report // *JBJS Case Connector*. – 2020. – V. 10. – No 4. – P. e20. DOI: 10.2106/JBJS.CC.20.00026.
 26. Manning W. et al. Improved mediolateral load distribution without adverse laxity pattern in robot-assisted knee arthroplasty compared to a standard manual measured resection technique // *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. – 2020. – V. 28. – P. 2835–2845. DOI: 10.1007/s00167-019-05631-y.
 27. Nodzo S.R. et al. Intraoperative placement of total hip arthroplasty components with robotic-arm assisted technology correlates with postoperative implant position: a CT-based study // *The Bone & Joint Journal*. – 2018. – V. 100. – No 10. – P. 1303–1309. DOI: 10.1302/0301-620X.100B10-BJJ-2018-0201.R1.
 28. Nd I.R.L. et al. Robotic-assisted total hip arthroplasty: outcomes at minimum two-year follow-up // *Surgical Technology International*. – 2017. – V. 30. – P. 365–372.
 29. Domb B.G. et al. Accuracy of component positioning in 1980 total hip arthroplasties: a comparative analysis by surgical technique and mode of guidance // *The Journal of Arthroplasty*. – 2015. – V. 30. – No 12. – P. 2208–2218. DOI: 10.1016/j.arth.2015.06.059.
 30. Nawabi D.H. et al. Haptically guided robotic technology in total hip arthroplasty: a cadaveric investigation // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, part H. // Journal of Engineering in Medicine*. – 2013. – V. 227. – No 3. – P. 302–309. DOI: 10.1177/0954411912468540.
 31. Damle A. et al. Diffusion of technology: Trends in robotic-assisted colorectal surgery // *The American Journal of Surgery*. – 2017. – V. 214. – No 5. – P. 820–824.
 32. Kayani B. et al. A prospective randomized controlled trial comparing the systemic inflammatory response in conventional jig-based total knee arthroplasty versus robotic-arm assisted total knee arthroplasty // *The Bone & Joint Journal*. – 2021. – V. 103. – No 1. – P. 113–122. DOI: 10.1302/0301-620X.103B1.BJJ-2020-0602.R2.
 33. Shaw J.H. et al. Minimal clinically important difference in robotic-assisted total knee arthroplasty versus standard manual total knee arthroplasty // *The Journal of Arthroplasty*. – 2021. – V. 36. – No 7. – P. S233–S241.
 34. St Mart J.P. et al. The three-year survivorship of robotically assisted versus non-robotically assisted unicompartmental knee arthroplasty: a study from the Australian Orthopaedic Association National Joint Replacement Registry // *The Bone & Joint Journal*. – 2020. – V. 102. – No 3. – P. 319–328. DOI: 10.1302/0301-620X.102B3.BJJ-2019-0713.R1.
 35. Redmond J.M. et al. The learning curve associated with robotic-assisted total hip arthroplasty // *The Journal of Arthroplasty*. – 2015. – V. 30. – No 1. – P. 50–54. DOI: 10.1016/j.arth.2014.08.003.
 36. Kong X. et al. A retrospective study comparing a single surgeon's experience on manual versus robot-assisted total hip arthroplasty after the learning curve of the latter procedure—a cohort study // *International Journal of Surgery*. – 2020. – V. 77. – P. 174–180. DOI: 10.1016/j.ijsu.2020.03.067.
 37. Kayani B. et al. Robotic-arm assisted total knee arthroplasty has a learning curve of seven cases for integration into the surgical workflow but no learning curve effect for accuracy of implant positioning // *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. – 2019. – V. 27. – P. 1132–1141. DOI: 10.1007/s00167-018-5138-5.
 38. Kayani B. et al. The learning curve of robotic-arm assisted acetabular cup positioning during total hip arthroplasty // *Hip International*. – 2021. – V. 31. – No 3. – P. 311–319. DOI: 10.1177/1120700019889334.
 39. Perets I. et al. Current topics in robotic-assisted total hip arthroplasty: a review // *Hip International*. – 2020. – V. 30. – No 2. – P. 118–124. DOI: 10.1177/1120700019893636.
 40. Perets I. et al. Robot-assisted total hip arthroplasty: clinical outcomes and complication rate // *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*. – 2018. – V. 14. – No 4. – P. e1912. DOI: 10.1002/rcs.1912.
 41. Langer S. et al. Importance of hip-spine syndrome in hip arthroplasty: influence on the outcome and therapeutic consequences // *Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie*. – 2023. – V. 161. – No 2. – P. 168–174. DOI: 10.1055/a-1527-7697.
 42. Cook R. et al. A traditional hip implant is as effective as newer types for people over 65 // *BMJ: British Medical Journal (Online)*. – 2019. – V. 366. DOI: 10.1136/bmj.l4230.
 43. Chai W. et al. Robot-assisted total hip arthroplasty for arthrodese hips // *Therapeutics and Clinical Risk Management*. – 2020. – P. 357–368. DOI: 10.2147/TCRM.S246565.
 44. Крылов С.В. и др. Использование блокады мышцы, выпрямляющей позвоночник, при операции тотального эндопротезирования тазобедренного сустава: клинический случай // *Кремлевская медицина. Клинический вестник*. – 2021. – № 1. – С. 116–119. [Krylov S.V. et al. The use of a blockade of the erector spinae muscle during total hip arthroplasty: a clinical case // *Kremlin Medicine. Klinicheskiy vestnik*. – 2021. – No 1. – P. 116–119. In Russian]. DOI:10.26269/kmdx-9z40.
 45. Tian H. Robotic assisted artificial hip and knee arthroplasty is an inevitable trend in the future // *Zhonghua yi xue za zhi*. – 2022. – V. 102. – No 1. – P. 4–8. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20210730-01692.
 46. Keating T.C. et al. Augmented reality in orthopedic practice and education // *Orthopedic Clinics*. – 2021. – V. 52. – No 1. – P. 15–26. DOI: 10.1016/j.ocl.2020.08.002.