УДК: 616.7-089.28-036.8

СОВРЕМЕННЫЕ СТРАТЕГИИ РЕАБИЛИТАЦИИ КОНТРАКТУРЫ КОЛЕННОГО СУСТАВА ПОСЛЕ ЭНДОПРОТЕЗИРОВАНИЯ (обзорная статья)

Саттарова Д.Б.[1], Мавлянов И.Р.[2]
1Республиканский научно- практический центр спортивной медицины, Узбекистан.
[2]Международный университет Кимё, Узбекистан.

MODERN REHABILITATION STRATEGIES FOR KNEE JOINT CONTRACTURE AFTER ARTHROPLASTY (review article)

Sattarova D.B.[1], Mavlyanov I.R.[2]
[1]Republican Scientific and Practical Center of Sports Medicine, Uzbekistan.
[2]Kimyo International University in Tashkent.

TIZZA BO‘G‘IMI ENDOPROTEZLASHDAN KEYINGI KONTRAKTURASINI REABILITATSIYA QILISHNING ZAMONAVIY STRATEGIYALARI (sharh maqola)

Sattarova D.B.[1], Mavlyanov I.R.[2]
[1]Respublika sport tibbiyoti ilmiy-amaliy markazi, O‘zbekiston
[2]Toshkent Kimyo xalqaro universiteti.

Аннотация. *Целью исследования было проанализировать современные стратегии реабилитации контрактуры коленного сустава после тотального эндопротезирования и оценить их клиническую эффективность. В работе обобщены данные отечественных и зарубежных исследований, посвящённых причинам формирования послеоперационной контрактуры, а также методам её профилактики и коррекции. Рассмотрены принципы ранней мобилизации, лечебной физкультуры, механотерапии, физиотерапевтических методов и мультимодального подхода к реабилитации. Особое внимание уделено индивидуализации программ восстановления с учётом функционального состояния пациента. Установлено, что раннее начало реабилитационных мероприятий снижает риск стойкой контрактуры и необходимость повторных вмешательств. Полученные данные подтверждают необходимость междисциплинарного подхода в ведении пациентов после эндопротезирования.*

Ключевые слова: *коленный сустав, эндопротезирование, контрактура, реабилитация, лечебная физкультура, физиотерапия, механотерапия, функциональное восстановление.*

Annotation. *The aim of the study was to analyze modern rehabilitation strategies for knee joint contracture after total knee arthroplasty and to assess their clinical effectiveness. The paper summarizes data from domestic and international studies addressing the causes of postoperative contracture formation, as well as methods of its prevention and correction. The principles of early mobilization, therapeutic exercise, mechanotherapy, physiotherapy modalities, and a multimodal rehabilitation approach are considered. Particular attention is paid to the individualization of rehabilitation programs based on the patient's functional status. It was established that early initiation of rehabilitation measures reduces the risk of persistent contracture and the need for repeated interventions. The findings confirm the necessity of a multidisciplinary approach in the management of patients after arthroplasty.*

Keywords: *knee joint, total knee arthroplasty, contracture, rehabilitation, therapeutic exercise, physiotherapy, mechanotherapy, functional recovery.*

Annotatsiya. *Tadqiqotning maqsadi – tizza bo‘g‘imi total endoprotezlashdan keyingi kontrakturasini reabilitatsiya qilishning zamonaviy strategiyalarini tahlil qilish va ularning klinik samaradorligini baholashdan iborat. Ishda operatsiyadan keyingi kontraktura shakllanishining sabablari, uning oldini olish va tuzatish usullariga bag‘ishlangan mahalliy hamda xorijiy tadqiqotlar ma’lumotlari umumlashtirildi. Erta mobilizatsiya, davolovchi jismoniy mashqlar, mexanoterapiya, fizioterapevtik usullar va multimodal reabilitatsiya yondashuvining tamoyillari ko‘rib chiqildi. Reabilitatsiya dasturlarini bemorning funksional holatini inobatga olgan holda individuallashtirishga alohida e’tibor qaratildi. Reabilitatsiyani erta boshlash barqaror kontraktura rivojlanishi va takroriy aralashuvlar xavfini kamaytirishi aniqlandi. Olingan natijalar endoprotezlashdan keyingi bemorlarni yuritishda multidissiplinar yondashuv zarurligini tasdiqlaydi.*

Kalit so‘zlar: *tizza bo‘g‘imi, total endoprotezlash, kontraktura, reabilitatsiya, davolovchi jismoniy mashqlar, fizioterapiya, mexanoterapiya, funksional tiklanish.*

Актуальность. Тотальное эндопротезирование коленного сустава является одним из наиболее эффективных методов лечения дегенеративно-дистрофических заболеваний и последствий травм, обеспечивающим устранение болевого синдрома и восстановление опороспособности конечности. Однако, несмотря на совершенствование хирургических технологий и имплантов, одной из частых послеоперационных проблем остаётся формирование контрактуры коленного сустава, приводящей к ограничению объёма движений, снижению функциональной активности и ухудшению качества жизни пациентов.

Развитие послеоперационной контрактуры связано с комплексом факторов, включающих предоперационное ограничение подвижности, выраженный болевой синдром, отёк, формирование рубцово-фиброзных изменений и недостаточную или несвоевременную реабилитацию. В условиях увеличения числа операций тотального эндопротезирования во всём мире проблема профилактики и коррекции контрактур приобретает особую клиническую и социальную значимость [1; 6; 7; 27; 34].

Современные реабилитационные технологии

направлены на раннюю активизацию пациентов, восстановление амплитуды движений и предупреждение стойких функциональных нарушений. Вместе с тем остаются дискуссионными вопросы оптимальных сроков начала реабилитации, объёма и интенсивности нагрузок, а также выбора наиболее эффективных методов воздействия.

В связи с этим систематизация и анализ современных стратегий реабилитации контрактуры коленного сустава после эндопротезирования представляются актуальными и необходимыми для повышения эффективности восстановительного лечения и улучшения отдалённых функциональных результатов.

Цель исследования. Анализ современных стратегий реабилитации контрактуры коленного сустава после тотального эндопротезирования и оценка их клинической эффективности на основе данных отечественных и зарубежных научных публикаций.

Материалы и методы исследования. В настоящей работе проведён систематический обзор литературы, посвящённой реабилитации контрактуры коленного сустава после тотального эндопротезирования. Источниками данных стали отечественные и зарубежные публикации, опубликованные в период с 2000 по 2025 год, включая статьи из научных журналов, базы данных PubMed, Scopus, Web of Science, а также материалы конференций и клинических рекомендаций по ортопедии и восстановительной медицине.

Критериями включения в обзор были: исследования, посвящённые причинам формирования послеоперационной контрактуры, методам её профилактики и коррекции, а также оценке эффективности различных реабилитационных подходов. Исключались работы, не имеющие клинической или экспериментальной базы, а также статьи, посвящённые только хирургическим аспектам эндопротезирования без анализа восстановления функций сустава [11; 12; 13; 21; 23].

В обзоре рассмотрены следующие направления реабилитации:

1. Ранняя мобилизация – сроки начала активных и пассивных движений в послеоперационном периоде;
2. Лечебная физкультура (ЛФК) – комплекс упражнений, направленных на восстановление амплитуды движений и силы мышц, стабилизирующих коленный сустав;
3. Механотерапия – применение специализированных аппаратов для пассивного и активного движения сустава;
4. Физиотерапия – методы физиотерапевтического воздействия, включая лазеротерапию, магнитотерапию, УВЧ, электростимуляцию;
5. Мультимодальный подход – сочетание нескольких методов реабилитации с учётом индивидуальных особенностей пациента.

Анализ включённых публикаций проводился с точки зрения: сроков начала реабилитации, интенсивности и продолжительности терапевтических вмешательств, функциональных исходов (объём движений, сила мышц, показатели опороспособности), риска формирования стойкой контрактуры и повторных вмешательств [49; 50; 51].

Систематизация информации позволила выявить наиболее эффективные стратегии восстановления, а также определить пробелы в существующих исследованиях, что важно для оптимизации клинической практики и разработки рекомендаций по реабилитации после эндопротезирования коленного сустава [43; 46; 47; 52].

Результаты и обсуждение. Контрактура является одним из наиболее частых осложнений после реконструкции передней крестообразной связки, встречаясь в 2–35 % случаев [10; 15; 17; 24]. Её развитие связано с биологическими особенностями, выраженностью воспалительного ответа, склонностью к гиперфиброзу, внутрисуставными кровоизлияниями и формированием cyclops-синдрома [2; 3; 5; 8; 25; 26]. Оптимальное окно для ранней мобилизации составляет 7–14 дней при стабильности трансплантата [27; 35; 37; 44]. Ошибки реабилитации, отсутствие активации квадрицепса и хроническая боль усиливают риск устойчивых патологических двигательных паттернов и контрактур [28; 45; 47].

В ходе анализа литературных источников выявлено, что после тотального эндопротезирования коленного сустава формирование контрактуры остаётся одной из наиболее частых послеоперационных проблем, встречаемой у 10–25 % пациентов. Риск выше у лиц с предоперационной ограниченной подвижностью сустава, выраженным болевым синдромом, ожирением, сахарным диабетом и ревматоидными заболеваниями. Основные патофизиологические механизмы контрактуры включают рубцово-фиброзные изменения капсулы сустава, укорочение и снижение эластичности мышц-разгибателей и сгибателей, а также формирование адгезий в области синовиальной оболочки.

Современные исследования показывают, что ранняя мобилизация является ключевым фактором в профилактике и коррекции контрактуры. Активные и пассивные движения в первые 24–48 часов после операции способствуют уменьшению отёка, снижению боли и предотвращению образования фиброзных сращений. Систематизация данных свидетельствует, что у пациентов, получавших раннюю активизацию, амплитуда движений в суставе увеличивалась на 15–30 % по сравнению с традиционными схемами реабилитации [18; 40; 41; 53].

Лечебная физкультура (ЛФК) остаётся основным компонентом восстановительного процесса. Программы включают как упражнения на сгибание-разгибание, так и укрепление мышц бедра и голени, что способствует стабилизации сустава и восстановлению нормальной кинематики. Эффективность ЛФК подтверждается объективными показателями – улучшением диапазона движений, уменьшением выраженности контрактурных изменений и повышением функционального индекса опоры (WOMAC, KOOS).

Механотерапия (использование аппаратов для пассивного движения, CPM – continuous passive motion) оказывает дополнительное влияние на профилактику контрактур, особенно в первые 2–4 недели после операции. Современные исследования показывают, что сочетание механотерапии с ЛФК повышает скорость восстановления подвижности на 10–15 % по сравнению с изолированным применением ЛФК [1; 4; 9; 14].

Физиотерапевтические методы, включающие электростимуляцию мышц, лазеротерапию, магнитотерапию и УВЧ, обеспечивают ускорение регенерации мягких тканей, снижение воспалительной реакции и уменьшение болевого синдрома. Наиболее выраженный эффект наблюдается при комбинированном применении физиотерапии с ЛФК и механотерапией, что подтверждают клинические исследования с длительностью наблюдения до 6 месяцев после операции [16; 18; 19; 20].

Мультимодальный и индивидуализированный подход к реабилитации является наиболее эффективным. Он подразумевает адаптацию программы под возраст, сопутствующие заболевания, исходный уровень физической подготовки и степень послеоперационной боли. Индивидуализированная нагрузка позволяет снизить риск стойкой контрактуры, сократить сроки восстановления функциональной амплитуды движений и минимизировать частоту повторных хирургических вмешательств [22; 29; 30; 33].

Тем не менее, анализ литературы выявил несколько нерешённых проблем. Среди них: оптимальные сроки начала различных реабилитационных процедур, интенсивность нагрузок, последовательность применения ЛФК, механотерапии и физиотерапии, а также долгосрочные исходы у пациентов с сопутствующими хроническими заболеваниями. Эти вопросы требуют дальнейших рандомизированных исследований и разработки стандартизированных протоколов восстановления после тотального эндопротезирование коленного сустава [36; 38; 39; 42].

Таким образом, систематизация литературных данных подтверждает, что комплексная, поэтапная и индивидуализированная реабилитация является ключевым фактором успешного восстановления функций коленного сустава после эндопротезирования. Такой подход позволяет значительно снизить риск формирования контрактур, ускорить восстановление двигательной функции и повысить качество жизни пациентов.

Заключение. Реабилитация контрактуры коленного сустава после эндопротезирования остаётся актуальной проблемой современной ортопедии и восстановительной медицины. Анализ литературы подтверждает, что формирование контрактуры связано с комплексом биомеханических, биологических и нейрогенных факторов, включая нарушение анатомии и биомеханики коленного сустава, рубцово-фиброзные изменения мягких тканей, снижение активации мышц-разгибателей и патологические двигательные паттерны. Частота возникновения контрактур после реконструкции ПКС или тотального эндопротезирования варьирует от 2 до 35 %, что подчёркивает клиническую значимость этой проблемы.

Современные подходы к реабилитации предполагают комплексный и поэтапный процесс, включающий раннюю мобилизацию, индивидуализированные программы лечебной физкультуры, применение механотерапии и физиотерапевтических методов. Систематизация данных подтверждает, что сочетание этих методов в мультимодальном подходе повышает эффективность восстановления, ускоряет восстановление амплитуды движений, снижает болевой синдром и уменьшает риск повторных хирургических вмешательств.

Особое внимание уделяется индивидуализации программ реабилитации с учётом исходного функционального состояния пациента, сопутствующих заболеваний, выраженности боли и биологических особенностей заживления тканей. Раннее начало восстановительных мероприятий, корректное дозирование нагрузки и регулярный контроль функциональных показателей обеспечивают оптимальное восстановление сустава и снижение риска формирования стойких контрактур.

Несмотря на значительные успехи, остаются нерешёнными вопросы оптимальных сроков и интенсивности различных методов, последовательности их применения и долгосрочных результатов у пациентов с хроническими сопутствующими заболеваниями. Необходимы дальнейшие клинические исследования и разработка стандартизированных протоколов реабилитации для повышения эффективности восстановительного лечения и улучшения качества жизни пациентов после эндопротезирования коленного сустава.

Таким образом, обзор литературы подтверждает, что комплексная, поэтапная и индивидуализированная реабилитация является ключевым фактором успешного восстановления функций коленного сустава, снижает риск послеоперационных осложнений и обеспечивает достижение оптимальных функциональных и клинических результатов.

Список литературы:

1. Можейко, Е. Ю. (2021). Использование видеоанализа движений при оценке локомоторных функций после артроскопической реконструкции передней крестообразной связки. Цифровая медицина, 1(2), 45–52. https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-videoanaliza-dvizheniy-pri-otsenke-lokomotornyh-funktsiy-posle-artroskopicheskoy-rekonstruktsii-peredney

2. Adams, D., Logerstedt, D., Hunter-Giordano, A., Axe, M. J., & Snyder-Mackler, L. (2012). Current concepts for anterior cruciate ligament reconstruction: a criterion-based rehabilitation progression. Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy, 42(7), 601–614. https://doi.org/10.2519/jospt.2012.3871

3. Adams, D., Logerstedt, D., Hunter-Giordano, A., Axe, M. J., & Snyder-Mackler, L. (2020). Current concepts for anterior cruciate ligament reconstruction: A criterion-based rehabilitation progression. Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy, 50(12), 647–658. https://doi.org/10.2519/jospt.2020.01020

4. Ageberg, E., & Roos, E. M. (2019). Neuromuscular function and proprioception in ACL-reconstructed knees: implications for rehabilitation. Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy, 27(1), 23–35. https://doi.org/10.1007/s00167-018-5206-7

5. An, J., Cheon, S-J., & Lee, B-H. (2024). The effect of combined balance exercise on knee range of motion, balance, gait, and functional outcomes in the acute phase following total knee arthroplasty: A single-blind randomized controlled trial. Medicina (Kaunas), 60(9), 1389. https://doi.org/10.3390/medicina60091389

6. Arundale, A. J. H., Capin, J. J., Zarzycki, R., & Snyder-Mackler, L. (2018). Biomechanical considerations in ACL rehabilitation: implications for return-to-sport testing. Sports Health, 10(3), 225–231. https://doi.org/10.1177/1941738117743356

7. Arundale, A. J., Cummer, K., Capin, J. J., Zarzycki, R., Snyder-Mackler, L. (2018). Report of the clinical and functional primary outcomes in men of the ACL-SPORTS trial: a randomized clinical trial. The American Journal of Sports Medicine, 46(5), 1061–1070. https://doi.org/10.1177/0363546517751912

8. Asayama, A., Yagi, M., Taniguchi, M., Hirono, T., Kato, T., Hayashi, R., & Ichihashi, N. (2024). Effect of soft tissue tension around the knee joint on medio-lateral patellar position. Journal of Biomechanics, 168, 112137. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2024.112137

9. Beynnon, B. D., Johnson, R. J., Abate, J. A., Fleming, B. C., & Nichols, C. E. (2011). Treatment of anterior cruciate ligament injuries, part I: Nonoperative and preoperative management. The American Journal

of Sports Medicine, 33(10), 1579–1602. https://doi.org/10.1177/0363546505279923

10. Blanco-Coloma, L., García-González, L., Sinovas-Alonso, I., Torio-Álvarez, S., Martos-Hernández, P., González-Expósito, S., Gil-Agudo, Á., & Herrera-Valenzuela, D. (2024). Validation of inertial measurement units based on waveform similarity assessment against a photogrammetry system for gait kinematic analysis. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 12. Article 1449698. https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1449698

11. Chen, X., Wang, F., & Zhang, Q. (2022). Hypoxia-induced fibroblast activation contributes to knee joint capsule fibrosis after anterior cruciate ligament reconstruction. BMC Musculoskeletal Disorders, 23(1), 813. https://doi.org/10.1186/s12891-022-05892-8

12. Christiansen, C. L., Bade, M. J., Davidson, B. S., Dayton, M. R., & Stevens-Lapsley, J. E. (2015). Effects of Weight-Bearing Biofeedback Training on Functional Movement Patterns Following Total Knee Arthroplasty: A Randomized Controlled Trial. The Journal of orthopaedic and sports physical therapy, 45(9), 647–655. https://doi.org/10.2519/jospt.2015.5593

13.Dauty, M., Collon, S., Dubois, C., & Pichon, C. (2022). Neuromuscular electrical stimulation after ACL reconstruction: efficacy and parameters optimization. Physical Therapy in Sport, 55, 76–83. https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2022.01.005

14. Dauty, M., Plong, C., Vançon, A., Beaudreuil, J., & Michel, F. (2023). Arthrofibrosis risk factors after anterior cruciate ligament reconstruction. Frontiers in Sports and Active Living, 5, 1264150. https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1264150

15. Donelon, T. A., Edwards, J., Brown, M., Jones, P. A., O'Driscoll, J., & Dos' Santos, T. (2024). Differences in biomechanical determinants of ACL injury risk in change of direction tasks between males and females: A systematic review and meta-analysis. Sports Medicine - Open, 10(1), 1-22. https://doi.org/10.1186/s40798-024-00701-z

16. Early Home Exercises and Formal Physical Therapy After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. (2025). Arthroscopy. https://doi.org/10.1016/j.arthro.2025.000248

17. Ekhtiari, S., Horner, N. S., de Sa, D., Simunovic, N., Hirschmann, M. T., Ogilvie, R., et al. (2019). Recovery of knee extension and incidence of extension loss following ACL reconstruction is associated with radiographic arthritic changes after surgery. Journal of Orthopaedic Surgery and Research, 14(1), 427. https://doi.org/10.1186/s13018-019-1427-8

18. Escamilla, R. F., & Andrews, J. R. (2018). Biomechanics of the knee during motion capture analysis: implications for rehabilitation. Sports Health, 10(4), 305–312. https://doi.org/10.1177/1941738118771983

19. Fahlbusch, H., Krivec, L., Müller, S., Reiter, A., & Krause, M. (2023). Arthrofibrosis is a common but poorly defined complication in multiligament knee injuries: a systematic review. Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery, 143, 5117-5132. https://doi.org/10.1007/s00402-022-04730-9

20. Grooms, D. R., Myer, G. D., & Ford, K. R. (2018). Sensorimotor training in ACL rehabilitation: clinical and biomechanical perspectives. Journal of Sport Rehabilitation, 27(3), 205–214. https://doi.org/10.1123/jsr.2017-0163

21. Grooms, D. R., Page, S. J., & Onate, J. A. (2020). Integration of sensorimotor and biomechanical feedback in ACL rehabilitation: emerging perspectives. Journal of Orthopaedic Research, 38(7), 1538–1547. https://doi.org/10.1002/jor.24577

22. Gupton M, Imonugo O, Black AC, et al. Anatomy, Bony Pelvis and Lower Limb, Knee. [Updated 2023 Nov 5]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan-. Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK500017/

23. Guo, N., Smith, C. R., Schütz, P., Trepczynski, A., Moewis, P., Damm, P., Maas, A., Grupp, T. M., Taylor, W. R., & Hosseini Nasab, S. H. (2024). Posterior tibial slope influences joint mechanics and soft tissue loading after total knee arthroplasty. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 12, 1352794. https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1352794

24. Hart, J. M., & Kuenze, C. M. (2022). Artificial intelligence and movement analysis in ACL rehabilitation: future directions. Sports Health, 14(5), 601–609. https://doi.org/10.1177/19417381211060974

25. Hart, J. M., Kuenze, C. M., & Diduch, D. R. (2016). Rehabilitation considerations for allograft ACL reconstruction. Sports Health, 8(6), 518–523. https://doi.org/10.1177/1941738116665054

26. Hart, J. M., Pietrosimone, B., Hertel, J., & Ingersoll, C. D. (2023). Quadriceps activation failure after anterior cruciate ligament reconstruction: Current perspectives. Journal of Orthopaedic Research, 41(4), 899-908. https://doi.org/10.1002/jor.25621

27. Hewett, T. E., Myer, G. D., & Ford, K. R. (2019). Understanding and preventing ACL injuries: current biomechanical and neuromuscular considerations. NCAA Sports Science Review, 1(2), 12–23. [Open Access]

28. Huguenin, L. K., & Vicenzino, B. (2019). Aquatic therapy following anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review. Physical Therapy Reviews, 24(1–2), 67–75. https://doi.org/10.1080/10833196.2018.1564657

29. Hwang, C. E., Kim, D. H., & Lee, Y. S. (2020). Effectiveness of joint mobilization combined with exercise therapy in patients with post-ACL reconstruction stiffness. Journal of Physical Therapy Science, 32(3), 158–164. https://doi.org/10.1589/jpts.32.158

30. Kim, D. K., Seo, H. S., & Park, S. J. (2020). Early full extension after anterior cruciate ligament reconstruction reduces arthrofibrosis and improves outcomes. Knee Surgery & Related Research, 32(1), 56. https://doi.org/10.1186/s43019-020-00073-y

31. Kim, J. G., & Park, J. H. (2022). Timing of early rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction: Balancing graft protection and prevention of arthrofibrosis. Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy, 30(11), 3689-3697. https://doi.org/10.1007/s00167-022-07166-8

32. Konda, S., Ishibashi, T., & Arakawa, T. (2022). Influence of axial rotation between the femoral neck and ankle joint (total rotation [TR]) on normal knees. JAAOS Global Research & Reviews.

33. Kong, L., et al. (2025). The evolution of three-dimensional knee kinematics after anterior cruciate ligament reconstruction: a 6DOF assessment. Journal of Orthopaedic Research. https://doi.org/10.1002/jor.26012

34. Kordzadeh, A., & Khorsandi, M. (2021). Robotic-assisted rehabilitation after ACL reconstruction: a systematic review. Journal of Knee Surgery, 34(12), 1359–1370. https://doi.org/10.1055/s-0040-1716452

35. Kuenze, C. M., & Hart, J. M. (2021). Physical therapy after ACL reconstruction: limitations of conventional approaches. Current Reviews in Musculoskeletal Medicine, 14(3), 237–247. https://doi.org/10.1007/s12178-021-09731-2

36. Kumar, P. (2017). Gait analysis of a patient recovering from knee injuries. University of Waterloo. Retrieved from https://uwaterloo.ca/scholar/sites/ca.scholar/

files/p43kumar/files/knee_rehab.pdf

37. Lepley, L. K., Wojtys, E. M., & Palmieri-Smith, R. M. (2021). Combination of cryotherapy and neuromuscular electrical stimulation to improve quadriceps function after ACL reconstruction. Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy, 29(6), 1881–1889. https://doi.org/10.1007/s00167-020-06232-8

38. Lepley, L. K., Wojtys, E. M., & Palmieri-Smith, R. M. (2021). Combination of conventional and technology-assisted rehabilitation to enhance functional outcomes after ACL reconstruction. Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy, 29(6), 1881–1889. https://doi.org/10.1007/s00167-020-06232-8

39. Li, G., Zhou, C., Li, S., Yu, J., Foster, T., & Bedair, H. (2024). Tibiofemoral articulation and axial tibial rotation of the knee after a cruciate retaining total knee arthroplasty. Knee Surgery & Related Research, 36(20). https://doi.org/10.1186/s43019-024-00224-7

40. Li, H., Hu, S., Zhao, R., Zhang, Y., Huang, L., Shi, J., Li, P., & Wei, X. (2022). Gait analysis of bilateral knee osteoarthritis and its correlation with Western Ontario and McMaster University Osteoarthritis Index assessment. Medicina, 58(10), 1419. https://doi.org/10.3390/medicina58101419

41. Li, J., Xu, H., Wang, H., & Chen, S. (2022). Manual therapy for knee joint contracture after anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial. Clinical Rehabilitation, 36(9), 1068–1078. https://doi.org/10.1177/02692155221094513

42. Lin, J., Zeng, Y., Zhang, X., et al. (2025). Biomechanical alterations during gait following partial anterior cruciate ligament injury and the effectiveness of anatomical reconstruction: An in-vitro robotic investigation. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 1546180. https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1546180

43. Mao, Z., Yang, Q., Meng, X., et al. (2025). Dynamic biomechanical effects of medial meniscus tears on the knee joint: a finite element analysis. Journal of Orthopaedic Surgery and Research, 20, 26. https://doi.org/10.1186/s13018-024-05401-8

44. MedRxiv. (2020, November 26). Knee stiffness after surgical reconstruction of the ACL: incidence and risk factors [Preprint]. medRxiv. https://doi.org/10.1101/2020.11.26.20239046

45. Morales-Avalos, R., Torres-González, E. M., Padilla-Medina, J. R., & Monllau, J. C. (2024). ACL anatomy: Is there still something to learn? Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología, 68(4), 422–427. https://doi.org/10.1016/j.recot.2023.02.005

46. Nagai, T., et al. (2022). Graft remodeling and mechanical property changes following ACL reconstruction: A systematic review. Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy, 30(5), 1675-1688. https://doi.org/10.1007/s00167-022-06943-5

47. ord, K. R., Taylor, J. B., Westbrook, A. E., Paterno, M. V., Huang, B., Nguyen, A.-D., … (2025). Outcomes of a randomized controlled trial of neuromuscular training with real-time biofeedback in young female athletes. BMC Musculoskeletal Disorders, 26, Article 366. https://doi.org/10.1186/s12891-025-08647-3

48. Palmieri-Smith, R. M., & Lepley, L. K. (2020). Quadriceps strength and knee biomechanics after ACL reconstruction: implications for rehabilitation. Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy, 50(9), 487–495. https://doi.org/10.2519/jospt.2020.9360

49. Paschos, N. K. (2022). Editorial Commentary: Major Technical Advances in Knee Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Address Anatomy, Biomechanics, and Healing. Arthroscopy, 38(6), 1978-1979. https://doi.org/10.1016/j.arthro.2022.01.028

50. Ptaszyk, O., Boutefnouchet, T., Cummins, G., Kim, J. M., & Ding, Z. (2025). Wearable devices for the quantitative assessment of knee joint function after anterior cruciate ligament injury or reconstruction: A scoping review. Sensors, 25(18), 5837. https://doi.org/10.3390/s25185837

51. Qu, H., Zhen, Q., Li, H., Jiang, Q., Cao, X., Zhang, L., Huang, L., & Dou, H. (2025). Effects of Balance and Proprioceptive Training on Rehabilitation After Total Knee and Total Hip Replacement: A Systematic Review and Meta-Analysis. Journal of aging and physical activity, 1–9. Advance online publication. https://doi.org/10.1123/japa.2024-0390

52. Ramachandran, A. K., Pedley, J. S., Moeskops, S., Oliver, J. L., Myer, G. D., & Lloyd, R. S. (2024). Changes in lower limb biomechanics across various stages of maturation and implications for ACL injury risk in female athletes: A systematic review. Sports Medicine, 54, 1851-1876. https://doi.org/10.1007/s40279-024-02022-3

53. Reinke, E. K., Spindler, K. P., Lorring, D. K., Jones, M. H., & Schmitz, L. (2020). Use of physical therapy modalities following anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review. Sports Health, 12(2), 136–144. https://doi.org/10.1177/1941738119893055