

КОРРЕКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОХОДКИ ПОСЛЕ ЭНДОПРОТЕЗИРОВАНИЯ КОЛЕННОГО СУСТАВА МЕТОДОМ АППАРАТНО-ПОДВЕСНОЙ КИНЕЗИОТЕРАПИИ

Б. Ш. Минасов¹, Р. Р. Якупов¹, В. Н. Акбашев^{1✉}, И. О. Евграфов¹, Ю. М. Мальсагов³, К. К. Каримов², И. Б. Минасов¹, А. А. Ахмельдинова¹, А. А. Швейкин¹

¹ Башкирский государственный медицинский университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия

² Таджикский государственный медицинский университет имени Абуали ибни Сино, Душанбе, Таджикистан

³ Республиканский онкологический диспансер, Плиево, Республика Ингушетия, Россия

Актуальность исследования обусловлена сохраняющимися нарушениями пострурального контроля и походки у пациентов после тотального эндопротезирования коленного сустава (ТЭКС), несмотря на устранение болевого синдрома и восстановление объема движений. Целью исследования было оценить влияние аппаратно-подвесной кинезиотерапии на стабилметрические и фазовые параметры походки у пациентов в отдаленные сроки после ТЭКС. Проведено проспективное сравнительное исследование с участием 93 пациентов (39 мужчин и 54 женщины; средний возраст $62,3 \pm 5,1$ года), включенных через 36 месяцев после операции. Пациенты были рандомизированы в основную группу (стандартная реабилитация с включением аппаратно-подвесной кинезиотерапии) и группу сравнения (стандартная программа). Эффективность оценивали с использованием стабилметрии и фазового анализа походки до и после трехнедельного курса реабилитации. В основной группе выявлено достоверное снижение нормированной площади векторограммы с 320 ± 60 до 190 ± 40 мм² ($p = 0,001$) и средней линейной скорости перемещения центра давления с $15,5 \pm 2,8$ до $8,7 \pm 2,1$ мм/с ($p = 0,002$). Длительность фазы опоры увеличилась на 18%, симметрия фаз ходьбы — с 74 ± 5 до $90 \pm 4\%$ ($p < 0,01$). В группе сравнения изменения были недостоверны ($p > 0,05$). Снижение показателей WOMAC отмечено в обеих группах без межгрупповых различий. Полученные данные подтверждают эффективность аппаратно-подвесной кинезиотерапии в коррекции поструральных и локомоторных нарушений после ТЭКС.

Ключевые слова: тотальное эндопротезирование коленного сустава, медицинская реабилитация, кинезиотерапия, стабилметрия, походка, осевой скелет, фаза опоры

Вклад авторов: Б. Ш. Минасов — концепция и дизайн исследования, научное руководство исследованием, утверждение рукописи; Р. Р. Якупов — дизайн исследования, организация клинического этапа, интерпретация результатов; В. Н. Акбашев — хирургическое лечение пациентов, клиническая оценка результатов; И. О. Евграфов — сбор клинического материала, участие в реализации реабилитационной программы; Ю. М. Мальсагов — клинико-функциональное обследование пациентов, формирование базы данных исследования; К. К. Каримов — статистическая обработка данных, анализ результатов исследования; И. Б. Минасов — проведение инструментальных исследований (стабилметрия, фазовый анализ походки), обработка и интерпретация полученных данных; А. А. Ахмельдинова — проведение курса аппаратно-подвесной кинезиотерапии, соблюдение протокола реабилитации; А. А. Швейкин — анализ научной литературы, интерпретация результатов, подготовка текста рукописи.

Соблюдение этических стандартов: исследование одобрено этическим комитетом ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России (протокол № 4 от 25 апреля 2025 г.), проведено в соответствии с принципами Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (в редакции 2013 г.). Все пациенты подписали добровольное информированное согласие на участие в исследовании.

✉ **Для корреспонденции:** Владислав Николаевич Акбашев
ул. Ленина, д. 3, г. Уфа, 450008, Россия; vlad-akb@mail.ru

Статья получена: 05.01.2026 **Статья принята к печати:** 20.01.2026 **Опубликована онлайн:** 03.02.2026

DOI: 10.24075/vrgmu.2026.003

Авторские права: © 2026 принадлежат авторам. **Лицензиат:** РНИМУ им. Н. И. Пирогова. Статья размещена в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

GAIT PARAMETER ADJUSTMENT AFTER KNEE ARTHROPLASTY BY KINESIOTHERAPY IN SUSPENSION

Minasov BSh¹, Yakupov RR¹, Akbashev VN^{1✉}, Evgrafov IO¹, Malsagov YuM³, Karimov KK², Minasov IB¹, Akhmeldinova AA¹, Shveykin AA¹

¹ Bashkir State Medical University, Ufa, Russia

² Avicenna Tajik State Medical University, Dushanbe, Tajikistan

³ Republican Oncology Dispensary, Plievo, Republic of Ingushetia, Russia

The study is relevant due to persistent postural control impairment and gait disorder in patients post total knee arthroplasty (TKA), despite pain relief and restoration of the range of motion. The study aimed to assess the effects of kinesiotherapy in suspension on the patients' stabilometry and gait phase parameters in the long term after TKA. A prospective comparative study was conducted that involved 93 patients (39 males and 54 females; average age 62.3 ± 5.1 years) enrolled 36 months after surgery. The patients were randomized into the index group (standard rehabilitation involving kinesiotherapy in suspension) and comparison group (standard program). The efficacy was assessed using stabilometry and gait phase analysis before and after the 3-week rehabilitation course. In the index group, a significant decrease in the normalized vectorogram area from 320 ± 60 to 190 ± 40 mm² ($p = 0.001$) and mean center of pressure movement linear speed from 15.5 ± 2.8 to 8.7 ± 2.1 mm/s ($p = 0.002$) was revealed. The stance phase duration increased by 18%, and the walking phase symmetry increased from 74 ± 5 to $90 \pm 4\%$ ($p < 0.01$). In the comparison group, the changes were non-significant ($p > 0.05$). The decrease in WOMAC scores was reported for both groups, there were no intergroup differences. The data obtained confirm the efficacy of using kinesiotherapy in suspension to adjust postural and locomotor disorders after TKA.

Keywords: total knee arthroplasty, medical rehabilitation; kinesiotherapy, stabilometry, gait, axial skeleton, stance phase

Author contribution: Minasov BSh — study concept and design, academic advising, manuscript approval; Yakupov RR — study design, clinical phase management, interpretation of the results; Akbashev VN — surgical treatment of patients, clinical assessment of the results; Evgrafov IO — clinical data acquisition, part in the rehabilitation program implementation; Malsagov YuM — clinical and functional assessment of patients, research database creation; Karimov KK — statistical data processing, analysis of the study results; Minasov IB — instrumental tests (stabilometry, gait phase analysis), data processing and interpretation; Akhmeldinova AA — course of kinesiotherapy in suspension, compliance with the rehabilitation protocol; Shveykin AA — scientific literature review, interpretation of the results, manuscript writing.

Compliance with ethical standards: the study was approved by the Ethics Committee of the Bashkir State Medical University (protocol No. 4 dated 25 April 2025) and conducted in accordance with the principles of the World Health Association Declaration of Helsinki (2013). All patients submitted the informed consent to take part in the study.

✉ **Correspondence should be addressed:** Vladislav N. Akbashev
Lenina, 3, Ufa, 450008, Russia; vlad-akb@mail.ru

Received: 05.01.2026 **Accepted:** 20.01.2026 **Published online:** 03.02.2026

DOI: 10.24075/brsmu.2026.003

Copyright: © 2026 by the authors. **Licensee:** Pirogov University. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Современная клиническая практика в условиях роста деструктивно-дистрофических поражений крупных суставов формируется как интегрированная система медицинской реабилитации, основанная на сочетании медикаментозных, хирургических и функциональных технологий [1, 2]. Ключевым механизмом восстановления выступает двигательная активность, обеспечивающая регуляцию структурно-функционального состояния соединительной ткани и формирование физиологического двигательного стереотипа. Ведущую роль в этих процессах играют центральные и периферические звенья постуральной регуляции, а нарушение силового баланса приводит к дискоординации движений и снижению эффективности нейромышечной регуляции [3].

Снижение двигательной активности ассоциируется с ростом дегенеративно-дистрофических заболеваний опорно-двигательного аппарата, в том числе с поражением крупных суставов и сегментов тазового пояса, что сопровождается хроническими системными нарушениями при преимущественно локальной клинической манифестации [4]. Декомпенсированный остеоартрит коленного сустава отражает прогрессирующую утрату структурно-функционального равновесия и сопровождается болевым синдромом, гиподинамией и вовлечением различных органов и систем [5, 6].

Несмотря на высокую эффективность тотального эндопротезирования коленного сустава в устранении боли и восстановлении объема движений, отдаленный функциональный результат во многом определяется качеством медицинской реабилитации, рассматриваемой как непрерывный адаптационный процесс, направленный на восстановление движения и социальную реинтеграцию пациента [7]. Одним из факторов, ограничивающих восстановление физиологичной походки, остается недостаточная стабилизация осевого скелета, прежде всего пояснично-тазового комплекса. Нарушение нейромышечного контроля мышц-стабилизаторов и асимметрия нагрузки приводят к изменению фаз опоры и ходьбы [8, 9].

В связи с этим современные реабилитационные программы ориентированы на коррекцию постуральных нарушений, восстановление проприоцептивного контроля и оптимизацию двигательных паттернов с использованием кинезиотерапии. Применение стабилизационных упражнений в условиях контролируемой нагрузки способствует улучшению постуральной устойчивости и нормализации фазовых характеристик походки. Использование автоматизированных и роботизированных систем позволяет объективизировать оценку функционального состояния пациентов [10, 11]. Вместе с тем данные о клинической эффективности подобных методик в отдаленном послеоперационном периоде остаются ограниченными, что определяет актуальность дальнейших исследований.

Научная новизна настоящего исследования заключается в проведении комплексной инструментальной оценки влияния аппаратно-подвесной кинезиотерапии на параметры постурального контроля и локомоции у пациентов после тотального эндопротезирования коленного сустава (ТЭКС). Цель исследования — оценить влияние аппаратно-подвесной кинезиотерапии с применением автоматизированного комплекса на стабилометрические и фазовые параметры походки у пациентов после ТЭКС в отдаленном послеоперационном периоде.

ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

Проведено проспективное сравнительное исследование, направленное на оценку влияния аппаратно-подвесной кинезиотерапии на показатели постуральной устойчивости и параметры походки у пациентов после ТЭКС.

Дизайн исследования

Пациентов включали в исследование через 36 месяцев после операции ТЭКС, что соответствовало периоду завершеного функционального ремоделирования костной ткани и позволяло оценить отдаленные биомеханические нарушения и эффективность позднего реабилитационного вмешательства. Всего было включено 93 пациента (39 мужчин, 54 женщины; средний возраст $62,3 \pm 5,1$ года), удовлетворяющих критериям отбора.

Оперативное вмешательство

Всем пациентам ранее было выполнено первичное ТЭКС с использованием заднестабилизированной конструкции (posterior stabilized, PS). Использовали цементные эндопротезы (Meril Life Sciences, Индия). Операцию проводили по стандартной методике через медиальный парapatеллярный доступ. К моменту включения в исследование по данным клинического и рентгенологического контроля у всех пациентов отмечалась стабильная фиксация компонентов эндопротеза.

Рандомизация и формирование групп

Рандомизацию проводили методом простой случайной выборки с использованием генератора случайных чисел. Распределение пациентов осуществляли независимые специалисты, не участвовавшие в реабилитационных мероприятиях. Сформированы две группы: группа сравнения (контрольная; $n = 46$), группа исследования (основная; $n = 47$)

Критерии включения

1. Возраст от 55 до 75 лет.
2. Первичное одностороннее ТЭКС, выполненное по поводу деформирующего остеоартрита III–IV стадии (по Kellgren–Lawrence).
3. Клинически стабильное состояние, отсутствие противопоказаний к выполнению физических нагрузок.
4. Когнитивная сохранность (оценка ≥ 24 баллов по шкале MMSE).
5. Подписанное информированное согласие на участие в исследовании.
6. Клинически, лабораторно и рентгенологически подтвержденная стабильность компонентов эндопротеза.

Критерии исключения

1. Наличие инфекционных осложнений, в том числе перипротезной инфекции.
2. Нестабильность или смещение компонентов эндопротеза по данным клинико-инструментального обследования.
3. Двустороннее эндопротезирование коленных суставов.
4. Выраженная деформация конечностей (вальгус/варус $> 15^\circ$) или укорочение оперированной ноги > 2 см.

Таблица 1. Сравнительная характеристика программ реабилитации

Направление терапии	Группа сравнения (стандартная программа)	Основная группа (стандарт + кинезиотерапия)
Физиотерапия	Электрическое поле ультравысокой частоты, электростимуляция мышц	
Дыхательная гимнастика	Упражнения на активацию диафрагмального дыхания	
Пассивные и активные движения	Пассивная мобилизация сустава, активные движения в пределах допустимой амплитуды	
Изометрические упражнения	Напряжение мышц бедра и ягодиц	
Упражнения на растяжку	Для мышц бедра, голени, поясничной области	
Координационные и баланс-упражнения	Балансировка с использованием гимнастического мяча и баланс-платформы	Подвесные упражнения с контролем центра давления и биологической обратной связи
Кинезиотерапия (аппаратно-подвесная)	Не применяли	Использовали подвесную систему, автоматизированный комплекс ORMED Kinezo («ORMED», Россия)
Стабилизация туловища и осевого скелета	Не проводилась	Упражнения на активацию мышц-стабилизаторов корпуса и таза
Проприоцептивная стимуляция	Ограниченно реализована через нестабильные поверхности	Целенаправленная тренировка с модуляцией опоры и перемещения центра тяжести
Функциональные перемещения с разгрузкой	Не проводили	Выполнялись с использованием подвесной разгрузки
Частота занятий	5 раз в неделю, 40–50 мин	5 раз в неделю, 50–60 мин
Продолжительность курса	3 недели (15 занятий)	3 недели (15 занятий)

5. Болевой синдром высокой интенсивности в покое (VAS > 5 баллов).

6. Тяжелые сопутствующие заболевания, ограничивающие физическую активность: хроническая сердечная недостаточность (ХСН) III–IV функционального класса по классификации Нью-Йоркской кардиологической ассоциации (New York Heart Association, NYHA); хроническая обструктивная болезнь легких (ХОБЛ) III–IV стадии по классификации GOLD (Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease); нестабильная ишемическая болезнь сердца (ИБС), включающая прогрессирующую стенокардию напряжения, стенокардию покоя, раннюю постинфарктную стенокардию, а также состояние после недавнего острого коронарного синдрома (менее 3 месяцев), сопровождающееся высоким риском коронарных осложнений и ограничением толерантности к физической нагрузке.

7. Активные или прогрессирующие заболевания центральной нервной системы (болезнь Паркинсона, рассеянный склероз, последствия инсульта < 12 месяцев).

8. Деменция или выраженные когнитивные нарушения (MMSE < 24).

9. Выраженные нарушения слуха или зрения, препятствующие выполнению упражнений.

10. Отказ от участия либо невозможность соблюдения режима тренировок и визитов.

Программа реабилитации

Сравнительная характеристика программ реабилитации представлена в табл. 1. Группа сравнения проходила стандартную программу реабилитации в соответствии с клиническими рекомендациями по восстановлению после ТЭКС (табл. 2). Программа включала физиотерапевтические процедуры — воздействие электрическим полем ультравысокой частоты (ЭП УВЧ) и электромиостимуляцию (ЭМС) ягодичных мышц, а также мышц бедра и голени оперированной и контралатеральной конечности, дыхательную гимнастику, пассивную и активную мобилизацию коленного сустава, изометрические упражнения для мышц бедра и ягодиц, упражнения на растяжение мышц нижней конечности и координационные упражнения с использованием гимнастического мяча и

нестабильных опор. Занятия проводили 5 раз в неделю по 40–50 мин в течение 3 недель.

Основная группа, помимо стандартной программы, дополнительно проходила курс аппаратно-подвесной кинезиотерапии (табл. 3) с применением автоматизированного комплекса и подвесных тренажеров. Программа включала упражнения, направленные на активацию глубоких мышц туловища и таза (мышечного корсета), проприоцептивную тренировку, восстановление симметрии фаз походки и выполнение функциональных перемещений в условиях частичной разгрузки массы тела. Использовали элементы стабилизационной тренировки и технологии биологической обратной связи. Курс составлял 15 ежедневных сессий продолжительностью 50–60 мин под контролем специалиста в течение 3 недель.

Методика оценки эффективности реабилитации

Оценку эффективности реабилитационных мероприятий проводили дважды — до начала курса и по завершении трехнедельного цикла (на 21-й день), с использованием объективных инструментальных и субъективных методов.

Стабилометрический анализ

Параметры поструральной устойчивости оценивали с применением стабилометрической платформы HUBER 360 (LPG Systems, Франция) в положении стоя с открытыми глазами. Основные анализируемые показатели:

- нормированная площадь векторограммы (НПВ, мм²) — отражает величину пространственного рассеивания центра давления;
- средняя линейная скорость перемещения ОЦД (СЛСП, мм/с) — индикатор компенсаторной активности;
- амплитуда колебаний центра давления в сагиттальной и фронтальной плоскостях — характеризует стабильность и равновесие.

Фазовый анализ походки и ходьбы

Кинематическую характеристику походки изучали с использованием системы Walker View (TecnoBody, Италия), оснащенной беговой дорожкой и оптическими датчиками.

Таблица 2. Состав и структура стандартной реабилитационной программы

Компонент программы	Продолжительность	Цель	Описание и особенности выполнения
Физиотерапия	15 процедур (ежедневно)	Снижение боли и отека, стимуляция регенерации	Электрофорез с Диклофенаком-АКОС, 1%-й раствор для наружного применения («Синтез ОАО», Россия) на область коленного сустава, низкочастотная переменная магнитотерапия
Дыхательная гимнастика	10–15 мин / занятие	Активация диафрагмального дыхания, профилактика гипостатических нарушений	Выполняли в положении лежа и сидя под счет инструктора; три подхода по 10 повторов
Пассивные и активные движения	10–15 мин / занятие	Восстановление объема движений в коленном суставе	Пассивные сгибания/разгибания с помощью инструктора; активные движения в положении лежа или сидя, в пределах безболезненной амплитуды
Изометрические упражнения	7 мин / занятие	"Укрепление мышц ягодичных, четырехглавой, двуглавой бедра, голени"	Напряжение мышц в статике, удержание по 3–5 с, 3–4 серии по 10 повторов
Растяжка	5–10 мин / занятие	Улучшение эластичности мышц, профилактика контрактур	Дозированное растягивание передней и задней группы бедра, голени и поясничной области, удержание по 15–20 с
Координационные упражнения	10 мин / занятие	Повышение устойчивости и равновесия	Упражнения с гимнастическим мячом, перенос веса тела, выполнение на нестабильных платформах с опорой и без
Общее время одного занятия	40–50 мин	Комплексное восстановление двигательной функции	Алгоритмируемость выполнения всех компонентов под контролем инструктора, 5 раз в неделю в течение 3 недель

Проводили регистрацию следующих параметров:

- длительность фазы опоры и фазы переноса;
- индекс двойной опоры (в процентах от общего цикла шага);
- симметрию фаз опоры и ходьбы оперированной и контралатеральной нижней конечности (в %);
- при наличии технической возможности — длину и частоту шагов.

Оценка состояния по шкалам

Для субъективной оценки функционального состояния применяли оригинальную шкалу WOMAC (Western Ontario and McMaster Universities Osteoarthritis Index), рекомендованную для оценки эффективности консервативной и хирургической терапии при гонартрозе. Шкала включает 24 вопроса, распределенных по трем разделам: боль (пять пунктов), скованность (два пункта) и физическая функция (17 пунктов). Ответы оценивали по пятибалльной шкале: 0 — отсутствие симптома, 4 — выраженное проявление. Суммарный балл рассчитывали

путем сложения всех пунктов (максимально 96 баллов). Более низкие значения соответствовали лучшему клиническому состоянию. Интерпретацию результатов проводили согласно общепринятой шкале: 0–14 баллов — «отличный» результат, 15–28 баллов — «хороший», 29–38 баллов — «удовлетворительный», более 38 баллов — «неудовлетворительный».

Статистическая обработка данных

Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием программного обеспечения SPSS Statistics (версия 26.0, IBM, США). Перед анализом проверяли нормальность распределения количественных переменных с помощью критерия Шапиро-Уилка. Для внутригруппового сравнения показателей до и после курса реабилитации применяли парный *t*-критерий Стьюдента при нормальном распределении или критерий Уилкоксона для связанных выборок при его нарушении. Сравнение между группами проводили с использованием независимого *t*-критерия Стьюдента

Таблица 3. Состав и структура программы реабилитации в группе исследования с компонентом кинезиотерапии

Компонент кинезиотерапии	Продолжительность	Цель	Описание и особенности выполнения
Упражнения на стабилизацию туловища и таза	10–15 мин / занятие	Активация глубоких мышц-стабилизаторов, формирование осевой устойчивости	Выполняли на подвесной системе с контролем положения корпуса; удержание и перемещение в статико-динамических режимах
Проприоцептивная тренировка	10–15 мин / занятие	Улучшение нейромышечного контроля и межмышечной координации	Задания на удержание равновесия с изменением опоры и направления нагрузки; использование платформы с переменным вектором усилия
Тренировка симметрии походки	10 мин / занятие	Восстановление фазового баланса и равномерного распределения нагрузки	Моделирование шага с обратной связью по параметрам фазы опоры и переноса; визуальное отображение отклонений
Функциональные перемещения с разгрузкой	10–15 мин / занятие	Улучшение двигательной активности с минимальной нагрузкой на сустав	Ходьба, полуприседания и подъемы с частичной разгрузкой массы тела в подвесной системе; дозированное увеличение нагрузки
Биологическая обратная связь	Встроенная в каждый модуль	Повышение осознанности движений и корректировка двигательных паттернов	Использование сенсорных модулей для визуального контроля положения тела и симметрии усилий
Общее время кинезиотренировки	20–30 мин / занятие	Комплексное улучшение стабилметрических и фазовых параметров	Проводили в составе общего занятия продолжительностью 50–60 мин, ежедневно в течение 3 недель

Таблица 4. Основные клинико-функциональные показатели до и после реабилитации

Показатель	Группа	До лечения (M ± SD)	После лечения (M ± SD)	p (внутри группы)	p (между группами)
Стабилометрия					
Нормированная площадь векторограммы (мм ²)	Основная (n = 47)	320 ± 60	190 ± 40	0,001	0,003
	Сравнения (n = 46)	330 ± 70	290 ± 65	0,12	
Средняя линейная скорость перемещения ОЦД (мм/с)	Основная (n = 47)	15,5 ± 2,8	8,7 ± 2,1	0,002	0,005
	Сравнения (n = 46)	16,1 ± 3,0	14,0 ± 2,9	0,09	
Амплитуда колебаний (сагиттальная пл.) (мм)	Основная (n = 47)	10,5 ± 2,1	8,7 ± 1,9	0,06	0,11
	Сравнения (n = 46)	10,8 ± 2,0	9,5 ± 1,8	0,08	
Фазы походки					
Длительность фазы опоры (с)	Основная (n = 47)	0,68 ± 0,07	0,80 ± 0,05	0,003	0,004
	Сравнения (n = 46)	0,67 ± 0,06	0,71 ± 0,06	0,15	
Симметрия фаз (%)	Основная (n = 47)	74 ± 5	90 ± 4	0,001	0,002
	Сравнения (n = 46)	75 ± 6	80 ± 5	0,08	
WOMAC (баллы)					
Общий балл	Основная (n = 47)	36 ± 4	22 ± 3	0,001	0,12
	Сравнения (n = 46)	37 ± 5	25 ± 4	0,004	

Примечание: p (внутри группы) — статистическая значимость различий между показателями до и после лечения в пределах одной группы; p (между группами) — статистическая значимость различий между основной группой и группой сравнения после лечения.

(при нормальном распределении) или U-критерия Манна–Уитни. Для категориальных переменных использовали χ^2 -критерий Пирсона. Статистическую значимость различий определяли при уровне $p < 0,05$. Все данные представлены в виде среднего значения и стандартного отклонения (M ± SD).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Трехнедельный курс реабилитации сопровождался изменениями стабилметрических и кинематических параметров в обеих группах, различавшихся по выраженности (табл. 4). Стабилметрический анализ выявил статистически значимое снижение нормированной площади векторограммы в основной группе ($p < 0,01$). В группе сравнения статистически значимых изменений не выявлено ($p > 0,05$). Средняя линейная скорость перемещения центра давления в основной группе снизилась статистически значимо ($p < 0,01$), тогда как в группе сравнения изменения не достигли статистической значимости ($p > 0,05$). При межгрупповом анализе выявлены статистически значимые различия по показателям нормированной площади векторограммы и средней линейной скорости перемещения центра давления после курса реабилитации ($p < 0,01$). При анализе походки установлены статистически значимое увеличение длительности фазы опоры и повышение симметрии фаз походки в основной группе ($p < 0,01$). В группе сравнения изменения фазовых параметров были статистически незначимыми ($p > 0,05$). Межгрупповые различия после лечения достигли статистической значимости ($p < 0,01$). По шкале WOMAC в обеих группах отмечено статистически значимое снижение суммарного балла по сравнению с исходным уровнем ($p < 0,01$). Межгрупповые различия после курса реабилитации не достигли статистической значимости ($p > 0,05$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Аппаратно-подвесная кинезиотерапия оказывает значимое влияние на постуральный контроль и характеристики

походки у пациентов после эндопротезирования коленного сустава. Прицельное воздействие на глубокие мышцы-стабилизаторы и мышцы-синергисты способствует формированию более сбалансированных двигательных паттернов и улучшению координации движений в фазах опоры и переноса. Снижение рассеивания центра давления и оптимизация нейромышечного контроля в основной группе, вероятно, связаны с активацией глубоких стабилизирующих мышц и повышением проприоцептивной чувствительности. Совокупность этих изменений способствует повышению устойчивости в статическом положении и снижению риска падений, что согласуется с данными исследований, демонстрирующих улучшение постуральных параметров после ТЭКС. Стандартная реабилитационная программа, примененная в группе сравнения, оказала менее выраженное влияние на стабилметрические показатели, что подчеркивает значимость целенаправленных упражнений с использованием автоматизированных комплексов и подвесных систем в восстановлении постурального контроля.

Формирование более сбалансированной локомоции в основной группе, проявляющееся увеличением длительности фазы опоры и повышением симметрии движений, отражает восстановление физиологического двигательного стереотипа. Это приводит к снижению асимметричной нагрузки на суставы, уменьшает риск компенсационной перегрузки контралатеральной конечности и избыточного напряжения компонентов эндопротеза. Полученные результаты согласуются с данными литературы, указывающими на эффективность интенсивных и структурированных реабилитационных программ в восстановлении временных и пространственных параметров походки после ТЭКС. В группе сравнения аналогичные изменения носили менее выраженный характер, что соответствует данным об ограниченной эффективности стандартных программ коррекции биомеханических нарушений походки.

Отсутствие статистически значимых различий между группами по шкале WOMAC, несмотря на снижение показателей в обеих группах, может быть обусловлено

ограниченной чувствительностью субъективных шкал к изменениям биомеханических параметров. Согласно литературным данным, WOMAC отражает выраженность болевого синдрома и функциональные ограничения в большей степени, чем характеристики постурального контроля и походки [12]. Это подчеркивает целесообразность включения объективных методов оценки, таких как стабилметрия и фазовый анализ походки, при анализе эффективности реабилитационных программ.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что аппаратно-подвесная кинезиотерапия как разновидность структурированного баланс-тренинга и проприоцептивных упражнений, оказывает выраженное влияние на параметры постурального контроля и характеристики походки у пациентов после тотального эндопротезирования коленного сустава. Современные систематические обзоры и метаанализы показывают, что включение баланс-тренинга в программы реабилитации обеспечивает более значимое улучшение статического и динамического равновесия по сравнению со стандартными программами, основанными преимущественно на общефункциональных упражнениях [13–16]. Данные литературы указывают, что подобные программы способствуют увеличению скорости ходьбы, сокращению времени выполнения тестов TUG и 6MWT, снижению рассеивания центра давления и повышению симметрии движений, что согласуется с результатами, полученными в основной группе настоящего исследования. Механизмы выявленных изменений можно объяснить с позиций нейромышечной регуляции. Баланс-тренинг и упражнения в подвесных системах активируют глубокие мышцы-стабилизаторы и мышцы-синергисты, усиливают проприоцептивную афферентацию и способствуют формированию более адекватных постуральных реакций. Улучшение нейромышечного контроля, проявляющееся снижением амплитуды колебаний центра давления и оптимизацией его траектории, описано в ряде исследований как ключевой фактор восстановления устойчивости после ТЭКС [13, 17, 18]. Использование аппаратно-подвесных систем позволяет безопасно повышать интенсивность упражнений, уменьшая болевой синдром и страх падения, что, по данным авторов, ускоряет восстановление функциональной мобильности и повышает вовлеченность пациента в процесс реабилитации [19].

Формирование более сбалансированной локомоции в основной группе, проявляющееся увеличением длительности фазы опоры и ростом симметрии движений, отражает восстановление физиологического двигательного стереотипа. Подобные изменения рассматриваются в литературе как признак снижения асимметричной нагрузки на контралатеральную конечность и профилактики ее перегрузки в послеоперационном периоде. Кроме того, оптимизация временных и пространственных параметров походки уменьшает избыточные нагрузки на компоненты эндопротеза, что имеет потенциальное значение для долговременной сохранности имплантата. Аналогичные данные приводятся в исследованиях, демонстрирующих эффективность интенсивных и структурированных реабилитационных программ в коррекции биомеханических нарушений походки после ТЭКС [20, 21]. В группе сравнения стандартная программа реабилитации обеспечивала положительную, но менее выраженную динамику стабилметрических

и биомеханических показателей. Подобные результаты соответствуют данным публикаций, где подчеркивается, что традиционные программы преимущественно направлены на восстановление объема движений и мышечной силы, но в меньшей степени влияют на постуральный контроль и координационные механизмы [22]. Это указывает на важность целенаправленного включения упражнений, ориентированных на баланс и проприоцепцию, в структуру послеоперационной реабилитации. Отсутствие статистически значимых различий между группами по шкале WOMAC, несмотря на объективные различия в параметрах постурального контроля и походки, также находит объяснение в литературе. Отмечается, что WOMAC в большей степени отражает выраженность болевого синдрома и субъективные функциональные ограничения, чем тонкие биомеханические и стабилметрические характеристики движений [23, 24]. Это подчеркивает ограниченную чувствительность субъективных шкал при оценке эффективности программ, направленных на коррекцию нейромышечной регуляции, и подтверждает целесообразность применения объективных инструментальных методов — стабилметрии и фазового анализа походки — при анализе результатов реабилитации.

Следует отметить, что рекомендации American Physical Therapy Association указывают на необходимость включения динамического баланс-тренинга и робот-ассистированных или подвесных технологий в реабилитацию после ТЭКС для оптимизации походки и снижения риска падений [13]. Полученные в настоящем исследовании данные подтверждают эти положения и демонстрируют клиническую целесообразность применения аппаратно-подвесной кинезиотерапии как компонента структурированной реабилитационной программы.

Таким образом, совокупность выявленных изменений позволяет рассматривать аппаратно-подвесную кинезиотерапию не только как средство восстановления мышечной силы и объема движений, но и как инструмент целенаправленного воздействия на механизмы постурального контроля, нейромышечной координации и формирование физиологичного двигательного стереотипа после эндопротезирования коленного сустава.

ВЫВОДЫ

Аппаратно-подвесная кинезиотерапия приводит к достоверным изменениям стабилметрических и фазовых параметров у пациентов после эндопротезирования коленного сустава. Сокращение рассеивания центра давления, оптимизация нейромышечного контроля, увеличение длительности фазы опоры и симметрии движений в основной группе отражают усиление постурального контроля и восстановление физиологичной походки. Эти изменения связаны с формированием сбалансированной локомоции и восстановлением физиологических локомоторных реакций, обеспечивающих равномерное распределение нагрузки на суставы и оптимальные условия функционирования эндопротеза, что подтверждает эффективность применения метода аппаратно-подвесной кинезиотерапии в программах реабилитации после ТЭКС, особенно на этапах восстановления координации и устойчивости. Отсутствие межгрупповых различий по шкале WOMAC подчеркивает необходимость использования объективных методов оценки в реабилитации.

Литература

- Cieza A, Causey K, Kamenov K, Hanson SW, Chatterji S, Vos T. Global estimates of the need for rehabilitation based on the Global Burden of Disease study 2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*. 2020; 396: 2006–17. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)32340-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)32340-0).
- Negrini S, Selb M, Kiekens C, Todhunter-Brown A, Arienti C, et al. Rehabilitation definition for research purposes. 3rd Cochrane Rehabilitation Methodology Meeting participants. A global stakeholders' initiative by Cochrane Rehabilitation. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2022; 58. Available from: <https://doi.org/10.23736/S1973-9087.22.07509-8>.
- Proske U, Gandevia SC. The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. *Physiol Rev*. 2012; 92: 1651–97. Available from: <https://doi.org/10.1152/physrev.00048.2011>.
- Booth FW, Roberts CK, Laye MJ. Lack of Exercise Is a Major Cause of Chronic Diseases. In: Prakash YS, editor. *Comprehensive Physiology*. Wiley, 2012; p. 1143–211. Available from: <https://doi.org/10.1002/cphy.c110025>.
- Hunter DJ, Bierma-Zeinstra S. Osteoarthritis. *The Lancet*. 2019; 393: 1745–59. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)30417-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)30417-9).
- Katz JN, Arant KR, Loeser RF. Diagnosis and Treatment of Hip and Knee Osteoarthritis: A Review. *JAMA*. 2021; 325: 568–78. Available from: <https://doi.org/10.1001/jama.2020.22171>.
- Wade DT. What is rehabilitation? An empirical investigation leading to an evidence-based description. *Clin Rehabil*. 2020; 34: 571–83. Available from: <https://doi.org/10.1177/0269215520905112>.
- Van Criekinge T, Winnock De Grave P, Luyckx T, Claeys K. Trunk control, motion and alignment after total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis. *Gait & Posture*. 2022; 94: 173–88. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2022.03.006>.
- Booij MJ, Van Royen BJ, Nolte PA, Twisk JWR, Harlaar J, Van Den Noort JC. Total knee arthroplasty improves gait adaptability in osteoarthritis patients; a pilot study. *Journal of Orthopaedics*. 2022; 34: 304–9. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jor.2022.08.003>.
- Sloan M, Premkumar A, Sheth NP. Projected Volume of Primary Total Joint Arthroplasty in the U.S., 2014 to 2030. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 2018; 100: 1455–60. Available from: <https://doi.org/10.2106/JBJS.17.01617>.
- Learmonth ID, Young C, Rorabeck C. The operation of the century: total hip replacement. *The Lancet*. 2007; 370: 1508–19. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(07\)60457-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(07)60457-7).
- Hadamus A, Błażkiewicz M, Wydra KT, Kowalska AJ, Łukowicz M, Białoszewski D, et al. Effectiveness of Early Rehabilitation with Exergaming in Virtual Reality on Gait in Patients after Total Knee Replacement. *J Clin Med*. 2022; 11: 4950. Available from: <https://doi.org/10.3390/jcm11174950>.
- Jette DU, Hunter SJ, Burkett L, Langham B, Logerstedt DS, Piuze NS, et al. Physical Therapist Management of Total Knee Arthroplasty. *Phys Ther*. 2020; 100: 1603–31. Available from: <https://doi.org/10.1093/ptj/pzaa099>.
- Liao C-D, Lin L-F, Huang Y-C, Huang S-W, Chou L-C, Liou T-H. Functional outcomes of outpatient balance training following total knee replacement in patients with knee osteoarthritis: a randomized controlled trial. *Clin Rehabil*. 2015; 29: 855–67. Available from: <https://doi.org/10.1177/0269215514564086>.
- Domínguez-Navarro F, Igual-Camacho C, Silvestre-Muñoz A, Roig-Casasús S, Blasco JM. Effects of balance and proprioceptive training on total hip and knee replacement rehabilitation: A systematic review and meta-analysis. *Gait Posture*. 2018; 62: 68–74. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.03.003>.
- Jaczewska-Bogacka J, Stolarczyk A. Improvement in Gait Pattern After Knee Arthroplasty Followed by Proprioceptive Neuromuscular Facilitation Physiotherapy. *Adv Exp Med Biol*. 2018; 1096: 1–9. Available from: https://doi.org/10.1007/5584_2018_187.
- Yu X, Zhuang R, Jin P. Evaluation of the efficacy after Total Knee Arthroplasty by Gait analysis in patients with Knee Osteoarthritis: a meta-analysis. *J Orthop Surg Res*. 2024; 19: 612. Available from: <https://doi.org/10.1186/s13018-024-05091-2>.
- Konnyu KJ, Thoma LM, Cao W, Aaron RK, Panagiotou OA, Bhuma MR, et al. Rehabilitation for Total Knee Arthroplasty: A Systematic Review. *Am J Phys Med Rehabil*. 2023; 102: 19–33. Available from: <https://doi.org/10.1097/PHM.0000000000002008>.
- Buhagiar MA, Naylor JM, Harris IA, Xuan W, Kohler F, Wright R, et al. Effect of Inpatient Rehabilitation vs a Monitored Home-Based Program on Mobility in Patients With Total Knee Arthroplasty: The HIHO Randomized Clinical Trial. *JAMA*. 2017; 317: 1037. Available from: <https://doi.org/10.1001/jama.2017.1224>.
- Pozzi F, Snyder-Mackler L, Zeni J. Physical exercise after knee arthroplasty: a systematic review of controlled trials. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2013; 49: 877–92.
- Mistry JB, Elmallah RDK, Bhav A, Chughtai M, Cherian JJ, McGinn T, et al. Rehabilitative Guidelines after Total Knee Arthroplasty: A Review. *J Knee Surg*. 2016; 29: 201–17. Available from: <https://doi.org/10.1055/s-0036-1579670>.
- Hamilton DF, Beard DJ, Barker KL, Macfarlane GJ, Tuck CE, Stoddart A, et al. Targeting rehabilitation to improve outcomes after total knee arthroplasty in patients at risk of poor outcomes: randomised controlled trial. *BMJ*. 2020; 371: m3576. Available from: <https://doi.org/10.1136/bmj.m3576>.
- Qu H, Zhen Q, Li H, Jiang Q, Cao X, Zhang L, et al. Effects of Balance and Proprioceptive Training on Rehabilitation After Total Knee and Total Hip Replacement: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Aging Phys Act*. 2026; 34: 82–90. Available from: <https://doi.org/10.1123/japa.2024-0390>.
- Artz N, Elvers KT, Lowe CM, Sackley C, Jepson P, Beswick AD. Effectiveness of physiotherapy exercise following total knee replacement: systematic review and meta-analysis. *BMC Musculoskelet Disord*. 2015; 16: 15. Available from: <https://doi.org/10.1186/s12891-015-0469-6>.

References

- Cieza A, Causey K, Kamenov K, Hanson SW, Chatterji S, Vos T. Global estimates of the need for rehabilitation based on the Global Burden of Disease study 2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*. 2020; 396: 2006–17. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)32340-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)32340-0).
- Negrini S, Selb M, Kiekens C, Todhunter-Brown A, Arienti C, et al. Rehabilitation definition for research purposes. 3rd Cochrane Rehabilitation Methodology Meeting participants. A global stakeholders' initiative by Cochrane Rehabilitation. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2022; 58. Available from: <https://doi.org/10.23736/S1973-9087.22.07509-8>.
- Proske U, Gandevia SC. The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. *Physiol Rev*. 2012; 92: 1651–97. Available from: <https://doi.org/10.1152/physrev.00048.2011>.
- Booth FW, Roberts CK, Laye MJ. Lack of Exercise Is a Major Cause of Chronic Diseases. In: Prakash YS, editor. *Comprehensive Physiology*. Wiley, 2012; p. 1143–211. Available from: <https://doi.org/10.1002/cphy.c110025>.
- Hunter DJ, Bierma-Zeinstra S. Osteoarthritis. *The Lancet*. 2019; 393: 1745–59. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)30417-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)30417-9).
- Katz JN, Arant KR, Loeser RF. Diagnosis and Treatment of Hip and Knee Osteoarthritis: A Review. *JAMA*. 2021; 325: 568–78. Available from: <https://doi.org/10.1001/jama.2020.22171>.
- Wade DT. What is rehabilitation? An empirical investigation leading to an evidence-based description. *Clin Rehabil*. 2020; 34: 571–83. Available from: <https://doi.org/10.1177/0269215520905112>.
- Van Criekinge T, Winnock De Grave P, Luyckx T, Claeys K. Trunk control, motion and alignment after total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis. *Gait & Posture*. 2022; 94: 173–88. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2022.03.006>.
- Booij MJ, Van Royen BJ, Nolte PA, Twisk JWR, Harlaar J, Van

- Den Noort JC. Total knee arthroplasty improves gait adaptability in osteoarthritis patients; a pilot study. *Journal of Orthopaedics*. 2022; 34: 304–9. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jor.2022.08.003>.
10. Sloan M, Premkumar A, Sheth NP. Projected Volume of Primary Total Joint Arthroplasty in the U.S., 2014 to 2030. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 2018; 100: 1455–60. Available from: <https://doi.org/10.2106/JBJS.17.01617>.
 11. Learmonth ID, Young C, Rorabeck C. The operation of the century: total hip replacement. *The Lancet*. 2007; 370: 1508–19. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(07\)60457-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(07)60457-7).
 12. Hadamus A, Błażkiewicz M, Wydra KT, Kowalska AJ, Łukowicz M, Białoszewski D, et al. Effectiveness of Early Rehabilitation with Exergaming in Virtual Reality on Gait in Patients after Total Knee Replacement. *J Clin Med*. 2022; 11: 4950. Available from: <https://doi.org/10.3390/jcm11174950>.
 13. Jette DU, Hunter SJ, Burkett L, Langham B, Logerstedt DS, Piuuzzi NS, et al. Physical Therapist Management of Total Knee Arthroplasty. *Phys Ther*. 2020; 100: 1603–31. Available from: <https://doi.org/10.1093/ptj/pzaa099>.
 14. Liao C-D, Lin L-F, Huang Y-C, Huang S-W, Chou L-C, Liou T-H. Functional outcomes of outpatient balance training following total knee replacement in patients with knee osteoarthritis: a randomized controlled trial. *Clin Rehabil*. 2015; 29: 855–67. Available from: <https://doi.org/10.1177/0269215514564086>.
 15. Domínguez-Navarro F, Igual-Camacho C, Silvestre-Muñoz A, Roig-Casasús S, Blasco JM. Effects of balance and proprioceptive training on total hip and knee replacement rehabilitation: A systematic review and meta-analysis. *Gait Posture*. 2018; 62: 68–74. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.03.003>.
 16. Jaczewska-Bogacka J, Stolarczyk A. Improvement in Gait Pattern After Knee Arthroplasty Followed by Proprioceptive Neuromuscular Facilitation Physiotherapy. *Adv Exp Med Biol*. 2018; 1096: 1–9. Available from: https://doi.org/10.1007/5584_2018_187.
 17. Yu X, Zhuang R, Jin P. Evaluation of the efficacy after Total Knee Arthroplasty by Gait analysis in patients with Knee Osteoarthritis: a meta-analysis. *J Orthop Surg Res*. 2024; 19: 612. Available from: <https://doi.org/10.1186/s13018-024-05091-2>.
 18. Konnyu KJ, Thoma LM, Cao W, Aaron RK, Panagiotou OA, Bhuma MR, et al. Rehabilitation for Total Knee Arthroplasty: A Systematic Review. *Am J Phys Med Rehabil*. 2023; 102: 19–33. Available from: <https://doi.org/10.1097/PHM.0000000000002008>.
 19. Buhagiar MA, Naylor JM, Harris IA, Xuan W, Kohler F, Wright R, et al. Effect of Inpatient Rehabilitation vs a Monitored Home-Based Program on Mobility in Patients With Total Knee Arthroplasty: The HIHO Randomized Clinical Trial. *JAMA*. 2017; 317: 1037. Available from: <https://doi.org/10.1001/jama.2017.1224>.
 20. Pozzi F, Snyder-Mackler L, Zeni J. Physical exercise after knee arthroplasty: a systematic review of controlled trials. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2013; 49: 877–92.
 21. Mistry JB, Elmallah RDK, Bhawe A, Chughtai M, Cherian JJ, McGinn T, et al. Rehabilitative Guidelines after Total Knee Arthroplasty: A Review. *J Knee Surg*. 2016; 29: 201–17. Available from: <https://doi.org/10.1055/s-0036-1579670>.
 22. Hamilton DF, Beard DJ, Barker KL, Macfarlane GJ, Tuck CE, Stoddart A, et al. Targeting rehabilitation to improve outcomes after total knee arthroplasty in patients at risk of poor outcomes: randomised controlled trial. *BMJ*. 2020; 371: m3576. Available from: <https://doi.org/10.1136/bmj.m3576>.
 23. Qu H, Zhen Q, Li H, Jiang Q, Cao X, Zhang L, et al. Effects of Balance and Proprioceptive Training on Rehabilitation After Total Knee and Total Hip Replacement: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Aging Phys Act*. 2026; 34: 82–90. Available from: <https://doi.org/10.1123/japa.2024-0390>.
 24. Artz N, Elvers KT, Lowe CM, Sackley C, Jepson P, Beswick AD. Effectiveness of physiotherapy exercise following total knee replacement: systematic review and meta-analysis. *BMC Musculoskelet Disord*. 2015; 16: 15. Available from: <https://doi.org/10.1186/s12891-015-0469-6>.