Культура физическая и здоровье. 2026. № 2 (98). С. 463-468.
Physical Culture and Health. 2026, 2 (98), 463-468.

Научная статья
УДК 796
DOI: 10.47438/1999-3455_2026_2_463

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕНЕНИЙ УГЛОВ СУСТАВОВ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ И ПОДОШВЕННОГО ДАВЛЕНИЯ Е КОНЬКОБЕЖЦЕВ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ СКОЛЬЖЕНИИ





Юрий Иванович Разинов [1], Ван Хуань [2]

Российский университет спорта «ГЦОЛИФК» [1, 2]
Москва, Россия
[1] Кандадат педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой теории и методики конькобежного спорта, фигурного катания на коньках и керлинга
ORCID 0009-0001-0877-2342
[2] Аспирант
ORCID 0009-0001-6509-6790

Аннотация. Исследование посвящено изучению отталкиванию в беге на конька по прямой с целью анализа взаимосвязи между изменениями углов суставов нижних конечностей и реакцией опоры во время бега на коньках молодых мужчин-спортсменов в конькобежном спорте в беге по прямой. Идея исследования предполагала изучение взаимодействия кинематики суставных углов (тазобедренного, коленного и голеностопного) суставов и силы реак-ции опоры во время выполнения отталкивания в цикле двойного шага конькобежца. С этой целью использовались носимые IMU-сенсоры регистрации изменений суставных углов нижних конечностей и система измерения сил реакции опоры во время выполнения цикла двойного шага. Запись показателей биомеханических параметров дви-жения и кинематики суставных углов фиксировались синхронно. Для анализа взаимосвязей применялись методы линейной и полиномиальной регрессии третьей степени. Результаты показали, что углы тазобедренного и голено-стопного суставов оказывают более выраженное воздействие на силу реакции опоры по сравнению с углами отве-дения бедра и сгибания колена во время выполнения отталкивания. Результаты полиномиальная регрессия проде-монстрировали значительно лучшее качество аппроксимации данных (R| до 0,773) по сравнению с линейной ре-грессией (R| до 0,396). Большая степень сгибания коленного сустава способствует повышению эффективности от-талкивания, однако сопровождается увеличением энергетических затрат, что требует подбора оптимальной позы с учётом индивидуальных особенностей спортсмена. Наибольшее влияние на давление стопы оказывает угол тыль-ного сгибания голеностопного сустава, что подтверждает существование сложной нелинейной взаимосвязи между биомеханическими и кинематическими параметрами отталкивания в конькобежном спорте.

Ключевые слова: конькобежный спорт, биомеханика, углы суставов, подошвенное давление, IMU-сенсоры, нижние конечности, голеностопный сустав, спортивная биомеханика.

Для цитирования: *Разинов Ю. И., Хуань В.* Динамические характеристики изменений углов суставов нижних конечностей и подошвенного давления конькобежцев при прямолинейном скольжении // Культура физическая и здоровье. 2026. № 2. С. 463-468. DOI: 10.47438/1999-3455_2026_2_463.

Введение

В конькобежном спорте эффективность отталкивания спортсмена тесно связана с его спортивными результатами [4].Эффективность каждого отталкивания зависит от компоненты силы отталкивания, направленной перпендикулярно направлению скольжения [5].

Данной проблематикой активно занимались зарубежные исследователи [6], которые изучали уравнения мощности и баланс мощности в конькобежном спорте, исследовали биомеханические аспекты техники отталкивания, работали над различными аспектами совершенствования техники, а также изучали взаимосвязь между изменениями техники и эффективностью отталкивания спортсменов. Таким образом, анализ техниче-

© Разинов Ю.И., Хуань В., 2026

ских движений отталкивания и эффективности отталкивания у конькобежцев имеет важное значение для оптимизации спортивных результатов [2].

В настоящее время инерциальные сенсорные единицы IMU все чаще применяются для анализа технических характеристик в конькобежном спорте [9]. Исследование Yosuke Tomita с коллегами показало высокую точность применения IMU для идентификации фаз движения в конькобежном спорте на длинных дистанциях. Результаты исследования продемонстрировали, что время опорной фазы, рассчитанное с использованием методов детекции ускорения и интегрированной детекции, отличалось от эталонного показателя не более чем на 3,6%, что подтверждает эффективность использования инерциальных датчиков для биомеханического анализа техники конькобежцев [10].Носимая система ИМУ для инерциального сенсора используется для анализа изменений углов суставов нижних конечностей в процессе отталкивания спортсмена, и оценка эффективности отталкивания на основе этих данных была доказана как жизнеспособная [3]. Эта система продемонстрировала высокую надежность в распознавании движений в процессе конькобежного спорта, что подтверждает её потенциал для применения в кинематических исследованиях и тренировках в спортивной науке [8].

Значение давления на стопу может быть использовано для оценки силы отталкивания спортсмена [2]. Пиковые характеристики кривой плантарного давления могут количественно отражать эффективность силового выхода в фазе отталкивания. Скорость нарастания и продолжительность пика давления положительно коррелируют со скоростью скольжения (Jiang,2014:137). Система инерциальных измерительных модулей (IMU) позволяет фиксировать кинематические параметры изменений углов суставов нижних конечностей, тогда как плантарное давление отражает пиковые и временные характеристики реакции опоры. Совместный анализ этих параметров обеспечивает целостное представление о механизмах формирования отталкивающего усилия с кинематической и биомеханической точек зрения.

Цель исследования: анализ динамических характеристик изменений углов суставов нижних конечностей и подошвенного давления в беге по прямой. **Задачи исследования:** 1. Изучить динамические характеристики изменений углов суставов нижних конечностей и давления на стопу конькобежцев в беге по прямой. 2. Исследовать динамическое влияние изменений каждого сустава нижних конечностей на подошвенное давление в процессе прямолинейного скольжения.

Материалы и методы исследования

В исследовании приняли участие 8 китайских конькобежцев-мужчин в возрасте 16,38±0,92 года, среди которых 3 спортсмена национального уровня и 5 спортсменов первого разряда. В данном исследовании для синхронного сбора кинематических и биомеханических данных использовались носимая инерциальная измерительная система (Mymotion) и система измерения давления на стопу (NovelTM Pedar-X). Испытуемые использовали конькобежные лезвия «clap-skat» для выполнения прямолинейного скольжения по ледовой поверхности. Всего было проведено 2 заезда по 100 метров каждый, и для анализа была выбрана наиболее успешная серия данных.

Во время тестирования система IMU и система измерения давления на стопу синхронно и в реальном времени регистрировали изменения углов суставов нижних конечностей и давления на стопу с частотой 100 Гц. Для точного мониторинга динамических изменений углов суставов нижних конечностей и давления на стопу у испытуемых спортсменов в данном исследовании период одного этапа данных был определён как промежуток от момента, когда одна из стоп касается поверхности и начинает создавать давление, до завершения полного цикла технического движения и отрыва этой стопы от поверхности.

Собранные кинематические и механические данные были очищены и обработаны с применением низкочастотной фильтрации с частотой среза фильтра 10 Гц. Система IMU позволила получить данные об углах сгибания тазобедренного и коленного суставов, углах отведения бедра и углах тыльного сгибания голеностопного сустава для обеих нижних конечностей. Система измерения подошвенного давления обеспечила точные данные о распределении нагрузки на правую и левую стопы в процессе выполнения технического движения.

Результаты и обсуждения

Данные о изменениях углов суставов нижних конечностей и давления на стопу с обеих сторон показывают, что максимальные значения давления на стопу составляют 852.1890 Н и 914.5481 Н, и эти значения наблюдаются на начальной стадии отталкивания спортсмена (таблица 1).

Таблица 1 – Индикаторы угла суставов левой и правой нижних конечностей

Показатели биомеханических параметров конькобежцев	Минимальное значение	Максимальное значение
Подошвенное давление слева(N)	24.3107	852.1890
Подошвенное давление правое(N)	30.8447	914.5481
Угол сгибания левого бедра(°)	40.6683	108.5853
Угол сгибания правого бедра(°)	34.8919	111.6727
Угол отведения левого бедра(°)	-15.2827	37.6926
Угол отведения правого бедра(°)	-13.2675	27.0657
Угол сгибания левого колена(°)	10.1230	88.8020
Угол сгибания правого колена(°)	14.3968	86.2682
Угол тыльного сгибания левой голеностопного сустава(°)	-14.9369	23.3977
Угол тыльного сгибания правой голеностопного сустава(°)	-11.3810	27.6113

В процессе изменения давления на стопу углы всех суставов нижних конечностей одновременно изменяются в разных направлениях и в разной степени.

Из графика изменений углов суставов левой нижней конечности и давления на подошву левой стопы можно наблюдать, что когда левая нога касается льда, давление на подошву левой стопы начинает быстро увеличиваться, при этом углы суставов левой ноги уменьшаются, в то время как правая нога выполняет отталкивание от льда (Рисунок 1). Когда давление на подошву левой стопы достигает 599.1 (N), углы тазобедренного, коленного и голеностопного суставов начинают посте-

пенно увеличиваться. В этот момент правая нога завершила отталкивание, и левая нога начинает однобокую поддержку при скольжении. Кинематический анализ отведения в тазобедренном суставе указывает на правостороннее смещение центра масс

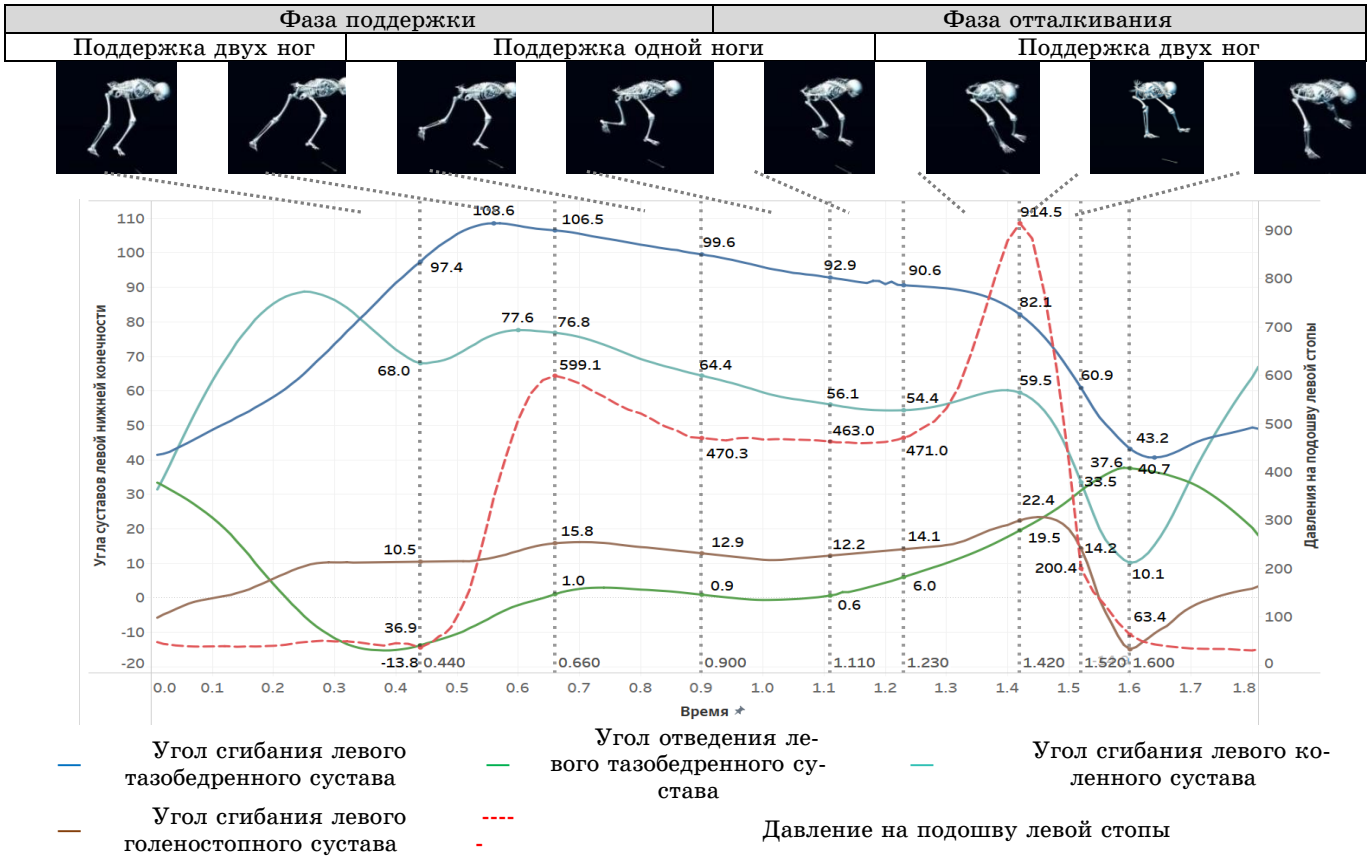


Рис. 1. Углы суставов левой нижней конечности и подошвенное давление атлета

Подобное латеральное перераспределение весовой нагрузки обусловливает незначительное снижение давления на левую стопу. Диаграмма подошвенного давления демонстрирует относительную стабилизацию нагрузочных показателей в период унилатеральной опоры на левую конечность. При приближении правой ноги к ледовой поверхности фиксируется стремительный рост давления на левую стопу с одновременным увеличением угловых параметров тазобедренного сустава. В момент активного разгибания левого коленного сустава подошвенная нагрузка достигает максимального значения 914,5Н. Последующее интенсивное разгибание голеностопного сустава характеризует реализацию отталкивательного воздействия от ледовой опоры. При полном выпрямлении левой конечности давление редуцируется до 56,5 Н, что свидетельствует о завершении отталкивательной фазы и переходе к опорному скольжению на правой ноге.

По данным исследования Селуянова В. Н., деформированное внешней силой тело способно накапливать энергию в виде энергии упругой деформации, которая, освобождаясь, совершает работу. Большинству спортивных движений (типа отталкивания) предшествуют движения в направлении. Больше амплитуда подседа (группировки) перед отталкиванием, тем, видимо, в большей мере накапливается энергия упругой деформации. При скольжении по реальной ледовой поверхности энергия упругой деформации разгибателей коленного сустава может быть использована для повышения эффективности отталкивания за счёт сгибания колена и приведения бедра поддерживающей ноги. Результаты настоящего исследования подтверждают этот вывод: на левой ноге коленный и голеностопный суставы во время отталкивания демонстрировали значительное увеличение уменьшение угла сгибания, что обеспечивало повышение эффективности отталкивания.

Из графика изменений углов суставов правой нижней конечности и давления на подошву правой стопы можно наблюдать, что когда правая нога касается льда, давление на подошву правой стопы начинает быстро увеличиваться, при этом углы суставов правой ноги уменьшаются (Рисунок 2). Когда давление на подошву правой стопы достигает 561 (N) , углы тазобедренного, коленного и голеностопного суставов начинают постепенно увеличиваться. В этот момент левая нога завершила отталкивание, и правая нога находится в фазе однобокой поддержки при скольжении. Анализ динамики отведения в тазобедренном суставе свидетельствует о латеральном перемещении общего центра масс спортсмена. Данное боковое перераспределение массы тела приводит к незначительному уменьшению нагрузки на правую стопу. График распределения подошвенного давления демонстрирует относительную стабильность показателей во время односторонней опорной фазы на правую конечность. В момент приближения левой ноги к ледовой поверхности наблюдается резкое увеличение давления на правую стопу при продолжающемся росте

угловых характеристик тазобедренного сустава. При активном разгибании коленного сустава подошвенная нагрузка на правую стопу достигает пикового значения 852,2 Н, после чего происходит интенсивное разгибание голеностопа, характеризующее выполнение отталкивательного движения. По данным исследования Селуянова В. Н., что при увеличении угла в коленном суставе сила разгибания ноги увеличивается. Данные данного исследования подтверждают этот вывод: при большем начальном угле коленного сустава в фазе отталкивания сила разгибания ноги увеличивается, что обеспечивает получение большей отталкивающей силы. При полном выпрямлении правой конечности давление снижается до 35,4 Н, что свидетельствует о завершении отталкивания и переходе к опорному скольжению на левой ноге.

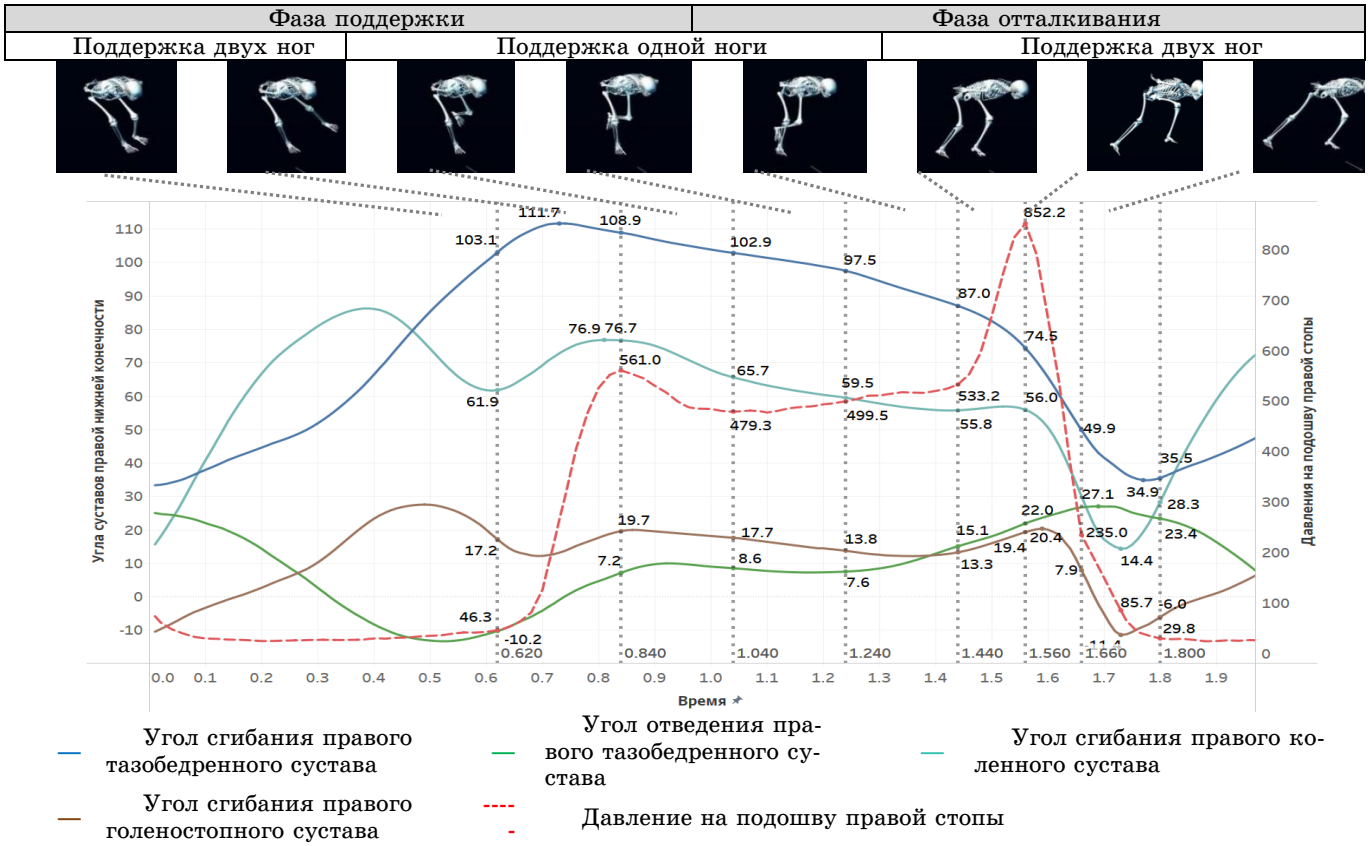


Рис. 2. Угол сустава правой нижней конечности и подошвенное давление

При достижении максимальных значений угла флексии бедра наблюдается существенное увеличение давления на стопу, однако по мере уменьшения данного угла происходит незначительное снижение давления с последующим резким нарастанием. При значении угла флексии бедра около 70° подошвенное давление достигает пиковых показателей, после чего при дальнейшем уменьшении углового параметра происходит стремительное снижение нагрузки. Отрицательные значения угла абдукции бедра демонстрируют минимальное воздействие на подошвенное давление. Прогрессивное увеличение угла абдукции бедра способствует росту давления на стопу до максимальных значений при приблизительно 20°. Максимальные значения угла флексии коленного сустава не оказывают существенного влияния на подошвенное давление. Редукция угла сгибания колена стимулирует увеличение давления на стопу до пиковых значений при около 50°, с последующим резким снижением при дальнейшем уменьшении углового параметра. При достижении угла флексии голеностопного сустава около 20° подошвенное давление максимизируется, после чего стремительно уменьшается при снижении данного углового показателя. Согласно выявленным тенденциям, вариации углов флексии бедра и экстензии голеностопного сустава демонстрируют более выраженное воздействие на подошвенное давление, в то время как изменения углов абдукции бедра и флексии коленного сустава характеризуются более плавным влиянием на давление стопы.

Выводы

1. Анализ изменений углов суставов нижних конечностей и давления на стопу показал, что тенденции изменений углов суставов левой и правой ног в целом совпадают с динамикой изменения давления на стопу. При достижении максимального угла сгибания тазобедренного сустава давление на стопу значительно возрастает, после чего с уменьшением угла сгибания давление достигает пика и постепенно снижается. При малых углах отведения тазобедренного сустава давление на стопу также невысокое, тогда как при достижении максимального угла отведения оно достигает пикового значения.

2. При максимальном угле сгибания коленного сустава реакция давления на стопу выражена слабо, однако с уменьшением угла сгибания давление постепенно возрастает до пика. Перед фазой отталкивания умеренное увеличение угла сгибания колена способствует повышению эффективности отталкивания, тогда как чрезмерное сгибание приводит к росту энергетических затрат. Скользя в высоком положении, коленный сустав сгибается меньше, активация мышц относительно низкая, а метаболические затраты энергии снижаются, что

облегчает выполнение скольжения. Однако высокое положение одновременно сокращает путь приложения силы, снижая эффективность отталкивания. Поэтому, согласно выводам исследования Селуянова В. Н., каждый спортсмен должен выбирать скользящую позу, соответствующую его функциональным возможностям, чтобы достичь оптимального баланса между эффективностью отталкивания и затратами энергии.

3. Среди всех суставов нижних конечностей изменения угла отведения тазобедренного сустава и угла сгибания колена оказывают относительно плавное влияние на давление на стопу. Изменения угла сгибания тазобедренного сустава и угла тыльного сгибания голеностопного сустава влияют на давление более выраженно, причем изменения угла тыльного сгибания голеностопного сустава оказывают наиболее резкое воздействие, а тенденции увеличения и снижения давления происходят достаточно быстро.

Библиографический список

1. Бур Р. В., Эттема Г., Дж. К., Ван Г. Х. Биомеханические аспекты техники отталкивания при катании на поворотах // Междунар. Ж. спортивной биомеханики. – 1987. – № 3. – С. 69-79.
2. Ван Х., У Ю., Лиу Дж., Чжу С. Исследование механической реакции стопы с учётом углов отталкивания при конькобежном спорте // Bioengineering. – 2023. – Т. 10. – С. 1218.
3. Вейгерс И., Кок М., Конингс М., Халлез Х., Де Вруэй Х., Клейс К. Методологический систематический обзор кинематики суставов нижних конечностей на основе инерциальных датчиков // Sensors (Базель). – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 673.
4. Ким К., Ким С. Дж., Пуревсурен Т., Хуягбаатар Б., Ли С., Ким Ю. Х. Новый метод оценки трёхмерного угла отталкивания при конькобежном спорте на короткой дистанции с использованием носимых инерциальных датчиков // Ж. механических инженеров в медицине. – 2019. – № 1233 (4). – С. 476-480.
5. Конинг Дж. Дж. Сила отталкивания в конькобежном спорте // Междунар. Ж. спортивной биомеханики. – 1987. – № 3. – С. 103-109.
6. Лимерейз А. Дж. Оценка результатов конькобежного спорта с использованием IMU : MSc Biomedical Engineering / A. J. Leemreize; научн. рук.: Dr. J. Reenalda MSc, Ir. B. L. Scheltinga BSc, Dr. A. Marin. – Унив. Твенте, Фак. биомед. инж., 2024. – 76 с.
7. Ма Гуодун. Распределение давления на стопу и характеристики передачи силы при двухтактной технике скоростного роликового катания // Спорт. Ж. – 2007. – № 05. – С. 59-62.
8. Сюй Д., Шин Л., Парк Дж., Пандей С. Б., Ян Дж., Ким К., Ку Д. Различия в положении тела на этапе отталкивания между катанием на льду и тренировкой на скейтборде // Материалы Междунар. конф. по спортивной биомеханике. – 2016. – С. 1155-1158.
9. Томита Ю., Иидзука Т., Ирисава К., Имура С. Обнаружение событий движения в конькобежном спорте на длинные дистанции с использованием носимых инерциальных датчиков // Sensors. – 2021. – Т. 21. – С. 3649.
10. Томита Ю. Обнаружение событий движения при конькобежном спорте на длинной дистанции с использованием носимых инерциальных датчиков // Sensors (Базель, Швейцария). – 2021. – № 21. – С. 1-9.

References

1. Bour, R. V., Ettema, G., K. J., Van G. H. Biomechanical aspects of repulsion technique in skating on turns // International Journal of Sports Biomechanics. – 1987. – No. 3. – P. 69-79.
2. Wang, H., Wu, Y., Liu, J., Zhu, X. Investigation of the mechanical response of the foot structure considering push-off angles in speed skating // Bioengineering. – 2023. – Vol. 10. – P. 1218.
3. Weygers, I., Kok, M., Konings, M., Hallez, H., De Vroey, H., Claeys, K. Inertial sensor-based lower limb joint kinematics: a methodological systematic review // Sensors (Basel). – 2020. – Vol. 20, No. 3. – P. 673.
4. Kim, K., Kim, S. J., Purevsuren, T., Khuyagbaatar, B., Lee, S., Kim, Y. H. A new method for estimating the three-dimensional angle of repulsion during short-track speed skating using wearable inertial measurement units // Journal of Mechanical Engineers in Medicine. – 2019. – No. 1233 (4). – P. 476-480.
5. Koning, J. J. The force of repulsion in speed skating // International Journal of Sports Biomechanics. – 1987. – No. 3. – P. 103-109.
6. Leemreize, A. J. Assessment of performance in speed skating using IMUs: MSc Biomedical Engineering [D] / A. J. Leemreize; supervisors: Dr. J. Reenalda MSc, Ir. B. L. Scheltinga BSc, Dr. A. Marin // University of Twente, Department of Biomedical Engineering, Faculty of Science and Technology. – 2024. – 76 p.
7. Ma, G. Plantar pressure distribution and transmission characteristics of dual push-off technique in speed roller skating // Journal of Physical Education. – 2007. – No. 05. – P. 59-62.
8. Xu, D., Shin, L., Park, J., Pandey, S. B., Yang, J., Kim, K., Koo, D. Differences in posture during the push-off phase between real ice skating and slide training // International Conference on Sports Biomechanics. – 2016. – P. 1155-1158.
9. Tomita, Y. Detection of motion events during long-distance ice skating using wearable inertial sensors // Sensors (Basel, Switzerland). – 2021. – Vol. 21. – P. 1-9.
10. Tomita, Y., Iizuka, T., Irisawa, K., Imura, S. Detection of movement events of long-track speed skating using wearable inertial sensors // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – P. 3649.

Поступила в редакцию 14.04.2026
Подписана в печать 30.06.2026

Original article
UDC 796
DOI: 10.47438/1999-3455_2026_2_463

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF CHANGES IN LOWER LIMB JOINT ANGLES AND PLANTAR PRESSURE DURING STRAIGHT-LINE SKATING IN YOUNG MALE SPEED SKATERS

Yurij I. Razinov [1], Wang Huan [2]

Russian University of Sport "GTSOLIFK" Moscow, Russia [1, 2]

[1] PhD in Pedagogy, Associate Professor, Head of the Department of Theory and Methodology of Speed Skating, Figure Skating, and Curling
ORCID 0009-0001-0877-2342
[2] Postgraduate student
ORCID 0009-0001-6509-6790

Abstract. The study is devoted to the investigation of push-off mechanics during straight-line speed skating, aiming to analyze the relationship between changes in lower limb joint angles and the ground reaction force during skating in young male speed skaters. The research concept involved examining the interaction between the kinematics of joint angles (hip, knee, and ankle) and the ground reaction force during the push-off phase within the double-stride cycle of skating.For this purpose, wearable IMU sensors were used to record changes in lower limb joint angles, and a force measurement system was applied to capture the ground reaction forces during the double-stride cycle. The recording of biomechanical movement parameters and joint angle kinematics was synchronized. To analyze the interrelations, meth-ods of linear and third-degree polynomial regression were applied.The results showed that the angles of the hip and ankle joints exert a more pronounced influence on the ground reaction force compared to hip abduction and knee flexion angles during push-off execution. The polynomial regression results demonstrated a significantly better data approxi-mation quality (RI up to 0.773) compared with linear regression (RI up to 0.396). A greater degree of knee flexion contributes to higher push-off efficiency; however, it also increases energy expenditure, which necessitates selecting an optimal posture according to the athlete's individual characteristics. The ankle dorsiflexion angle has the greatest impact on foot pressure, confirming the existence of a complex nonlinear relationship between the biomechanical and kinematic parameters of push-off in speed skating.

Keywords: speed skating, biomechanics, joint angles, plantar pressure, IMU sensors, lower limbs, ankle joint, sports biomechanics.

Cite as: *Razinov Yu. I., Huan W.* Dynamic characteristics of changes in the angles of the lower limb joints and plantar pressure e of speed skaters during rectilinear gliding // Physical Culture and Health. 2026. No. 2. P. 463-468. DOI: 10.47438/1999-3455_2026_2_463.

Received 14.04.2026
Accepted 30.06.2026