

Моделирование динамических характеристик спринтерского бега по виражу в условиях легкоатлетического манежа

Шиманский Александр Андреевич

Национальный государственный Университет физической культуры, спорта и здоровья имени П. Ф. Лесгафта, Санкт-Петербург

Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет

Аннотация. Динамические характеристики спринтерского бега по виражу в условиях манежа в значительной степени обусловлены наличием различий в центробежной силе на разных дорожках и их конфигурации.

Цель исследования – проектирование прогностических моделей динамических характеристик опорных периодов спринтерского бега на различных дорожках виража в условиях легкоатлетического манежа.

Методы и организация исследования. Для достижения цели был подобран комплекс методов исследования: анализ научно-методической литературы; педагогическое наблюдение; антропометрия; оптическая регистрация параметров техники; тензометрия (внутриобувная система измерения давления «Tekscan»); моделирование; методы математической статистики. В констатирующем эксперименте, который проводился в период подготовки к соревнованиям по легкой атлетике (декабрь 2024 г.) в СК «Легкоатлетический манеж», г. Санкт-Петербург, приняли участие шесть высококвалифицированных легкоатлетов-спринтеров, специализирующихся в беге на дистанции 200 м и 400 м.

Результаты исследования и выводы. В процессе исследования разработаны многофакторные регрессионные модели, позволяющие прогнозировать силу давления на опору в условиях спринтерского бега по виражу на различных дорожках легкоатлетического манежа с учетом антропометрии спортсменов.

Ключевые слова: легкая атлетика, спринтерский бег, легкоатлетический манеж, динамические характеристики, прогностическая модель

Modeling the dynamic characteristics of sprint running on the curve in an indoor athletics arena

Shimansky Aleksandr Andreevich

*Lesgaft National State University of Physical Education, Sport and Health, St. Petersburg
Saint-Petersburg State Pediatric Medical University*

Abstract. The dynamic characteristics of sprinting on a curve in an indoor arena are largely determined by the differences in centrifugal force on various lanes and their configuration.

The purpose of the study is to develop predictive models of the dynamic characteristics of the stance phases during sprinting on different lanes of the curved track in an indoor athletics arena.

Research methods and organization. To achieve the objective, a set of research methods was selected: analysis of scientific and methodological literature; pedagogical observation; anthropometry; optical registration of technique parameters; tensometry (in-shoe pressure measurement system "Tekscan"); modeling; methods of mathematical statistics. In the diagnostic experiment conducted during the preparation period for athletics competitions (December 2024) at the Athletic Arena sports complex in St. Petersburg, six highly qualified sprinters specializing in the 200 m and 400 m events participated.

Research results and conclusions. During the study, multifactorial regression models were developed that allow for predicting the pressure force on the support during sprinting on curves on various tracks of an athletic indoor arena, taking into account the athletes' anthropometry.

Keywords: athletics, sprinting, indoor athletics arena, dynamic characteristics, predictive model

Введение. В настоящее время техника спринтерского бега достаточно детально изучена [1-3]. Однако проблема технической подготовки легкоатлетов-спринтеров, направленной на рационализацию бега по виражу, остается актуальной. В исследованиях чаще всего рассматривалась биомеханика звеньев тела в беге по прямой и виражу на горизонтальной плоскости, то есть на стадионе, в меньшей

степени – в условиях манежа; научные труды, посвященные специфике спринтерского бега на различных дорожках виражка в манеже, практически отсутствуют. На данный момент остаются неизученными динамические характеристики бега на различных дорожках виражка в условиях манежа, что, в свою очередь, ограничивает представление о темпо-ритмовой структуре бега, разработку прогностических моделей скорости бега на дорожках виражка и эффективных средств коррекции техники, позволяющих минимизировать влияние фактора центробежной силы. В связи с этим, **целью** исследования являлось проектирование прогностических моделей динамических характеристик опорных периодов спринтерского бега на различных дорожках виражка в условиях манежа.

Методы и организация исследования. Для достижения цели был подобран комплекс методов исследования: анализ научно-методической литературы; педагогическое наблюдение; антропометрия; оптическая регистрация параметров техники; тензометрия (внутриобувная система измерения давления «Tekscan»); моделирование; методы математической статистики.

Результаты исследования и их обсуждение. Рост рекордов в спринтерском беге не отличается высокими темпами, так как основное физическое качество легкоатлета-спринтера – быстрота – является наиболее консервативным и сравнительно мало поддается тренировочным воздействиям [3]. При этом детерминантой результативности бега на дистанциях выше ста метров в манеже является скорость бега по виражу [1-3], обусловленная воздействием центробежной силы на тело спортсмена.

В процессе предварительных исследований и анализа взаимосвязи номера легкоатлетической дорожки в манеже и места, занятого в беге на 400 м на чемпионатах мира по легкой атлетике 2016-2024 гг. в закрытых помещениях [4], было установлено, что существует значительное влияние дорожки на итоговый результат. Данный факт подтвердила статистически значимая обратная связь результата бега и номера дорожки, по которой стартовал спортсмен. При этом, исходя из имеющихся данных, преимущество в скорости бега достигалось, в том числе, за счет меньшей нагрузки, обусловленной компонентой центробежной силы, действующей по продольной оси тела легкоатлета-спринтера сверху вниз, сокращения длительности периодов опоры, смены положений маховых звеньев (ног) и, в целом, бегового цикла, а также увеличения частоты беговых шагов [5, 6].

Учитывая, что биомеханические особенности спринтерского бега по виражу обуславливают выраженные различия кинематики стопы и голени ног спортсмена [6], а радиус виражка в условиях манежа в большей степени, чем на стадионе, определяет различия в ее проявлении на разных дорожках, возникла необходимость изучения различий в силе давления стопами на опору в беге на различных дорожках (табл. 1).

В процессе анализа показателей силы давления стопами на дорожку учитывался ряд специфических особенностей спринтерского бега по виражу в манеже:

- чем меньше радиус кривизны дорожки на вираже, тем больше центробежная сила и сила давления стопами на дорожку;
- чем больше радиус кривизны дорожки на вираже, тем меньше центробежная сила и сила давления стопами на дорожку;
- центробежная сила в спринтерском беге на вираже является основным фактором, влияющим на характер давления стопами на опору [6];
- уклон виражка определяет различия в давлении стопами на опору;

- антропометрические особенности спортсмена влияют на центробежную силу и силу давления стопами на дорожку.

Таблица 1 – Основные характеристики, определяющие разницу в силе давления стопами на дорожку в спринтерском беге в условиях легкоатлетического манежа

№ п/п	Характеристика	Показатель
1	Сила давления левой ногой на опору при беге по прямой (кгс/ см ²)	150,33
2	Сила давления правой ногой на опору при беге по прямой (кгс/ см ²)	204,77
3	Сила давления левой ногой на опору при беге по 1-ой дорожке вираже (кгс/см ²)	232,29
4	Сила давления правой ногой на опору при беге по 1-ой дорожке вираже (кгс/см ²)	268,05
5	Сила давления левой ногой на опору при беге по 3-ей дорожке вираже (кгс/см ²)	189,17
6	Сила давления правой ногой на опору при беге по 3-ей дорожке вираже (кгс/см ²)	251,95
7	Сила давления левой ногой на опору при беге по 5-ой дорожке вираже (кгс/см ²)	136,42
8	Сила давления правой ногой на опору при беге по 5-ой дорожке вираже (кгс/см ²)	203,11
9	Длина 1 дорожки (м)	200
10	Длина 3 дорожки (м)	206
11	Длина 5 дорожки (м)	212
12	Радиус вираже 1 дорожки (м)	15
13	Радиус вираже 3 дорожки (м)	16,5
14	Радиус вираже 5 дорожки (м)	18,5
15	1 дорожка, уклон вираже (°/град)	15
16	3 дорожка, уклон вираже (°/град)	11,5
17	5 дорожка, уклон вираже (°/град)	10

Анализ основных характеристик, определяющих разницу в силе давления на опору при беге легкоатлетов-спринтеров по прямой и виражу, позволил выделить основные тенденции и предложить общую структуру для оценки показателей:

- сила давления на вираже больше силы давления на прямой: это общий принцип, обусловленный наличием центробежной силы на вираже;

- сила давления на первой дорожке вираже больше, чем на третьей; а на третьей дорожке вираже больше, чем на пятой: при прочих равных условиях, чем ближе дорожка к центру, тем больше центробежная сила и давление на опору;

- в спринтерском беге на вираже сила давления и нагрузка на правую ногу больше, чем на левую.

Таким образом, ориентировочная формула для оценки силы давления имела следующий вид: $P_{вираж} = P_{прямая} + \Delta P_{ц/б.} - \Delta P_{уклон}$, где: $P_{вираж}$ – сила давления на опору на вираже; $P_{прямая}$ – сила давления на опору на прямой; $\Delta P_{ц/б.}$ – изменение силы давления из-за центробежной силы (зависит от радиуса вираже и скорости бега); $\Delta P_{уклон}$ – изменение силы давления из-за уклона вираже (уменьшает центробежную силу).

Выполненные расчеты позволили осуществить сравнительный анализ силы давления для высококвалифицированных спортсменов на разных дорожках. Было установлено, что существует разница в давлении левой и правой ногами на дорожках вираже, подтверждающая увеличение нагрузки на внешнюю ногу (правую) с уменьшением радиуса вираже и ее снижение – с увеличением. Выраженность данной тенденции зависела от индивидуальных различий (скорости бега и антропометрических особенностей легкоатлета-спринтера).

Исходя из вышесказанного, меньшая сила давления на опору и асимметрия позволяла спортсмену сократить энергетические затраты на поддержание равновесия, синхронизацию отталкивания, что создавало благоприятные условия для предотвращения уменьшения длины и частоты шагов.

На основе данных тензометрии были получены пропорции силы давления на опору для левой и правой ног на вираже относительно показателей на дорожках на прямой. Для каждой ноги и дорожки были определены коэффициенты, информирующие, во сколько раз сила давления на вираже больше (или меньше), чем сила давления на прямой (табл. 2).

Таблица 2 – Соотношение коэффициентов силы давления (K_{cd}) стопами на дорожки в спринтерском беге по виражу

Опорная нога	Дорожка	(K_{cd})	Интерпретация коэффициента силы давления
левая	1	$\approx 1,55$	на вираже больше на 55%, чем на прямой
	3	$\approx 1,26$	на вираже больше на 26%, чем на прямой
	5	$\approx 0,91$	на вираже меньше на 9%, чем на прямой
правая	1	$\approx 1,31$	на вираже больше на 31%, чем на прямой
	3	$\approx 1,23$	на вираже больше на 23%, чем на прямой
	5	$\approx 0,99$	на вираже всего на 1% меньше, чем на прямой

При беге по первой дорожке, характеризующейся более крутым виражом, сила давления значительно возрастает как на левую, так и на правую ногу, что связано, в том числе, с выраженным проявлением компоненты центробежной силы, действующей по продольной оси тела легкоатлета-спринтера сверху вниз и дополнительно загружающей его [6]. На третьей дорожке сила давления также увеличивается, но в меньшей степени, чем на первой. Пятой дорожке свойственна наименьшая сила давления левой ногой, а правой остается примерно такой же, как на прямой.

То есть, на пятой дорожке спортсмену легче поддерживать равновесие для направленного воздействия на опору, в отличие от первой и третьей, требующих специальной адаптации к меньшему радиусу кривизны дорожки.

Учитывая, что бег по виражу является неотъемлемой частью спринтерских дисциплин в легкой атлетике, особенно в манеже, где вираж повторяется в два раза чаще, данные условия криволинейного движения обуславливают сложность биомеханических перестроек при изменении номера беговой дорожки. В связи с этим был осуществлен анализ влияния номера дорожки на силу давления, оказываемую легкоатлетами-спринтерами на опору при беге на вираже в манеже (табл. 3).

Таблица 3 – Взаимосвязь номера дорожки и силы давления на опору в беге по виражу высококвалифицированных легкоатлетов-спринтеров

Коррелируемые компоненты	Характеристика корреляционной связи	
	r	Теснота связи по шкале Чеддока
дорожка – сила давления левой ногой на опору при беге по виражу	-0,45	Умеренная
дорожка – сила давления правой ногой на опору при беге по виражу	-0,30	Умеренная

В процессе исследования была дана количественная оценка взаимосвязи между номером дорожки и величиной силы давления, а также обсуждение потенциальных механизмов, лежащих в основе наблюдаемых изменений.

Для этого были использованы уравнения парной линейной регрессии, описывающие зависимость силы давления на левую и правую ноги от номера дорожки. Полученные модели позволили оценить и сравнить величины силы давления стопами в спринтерском беге в условиях изменения дорожки, характерных для забегов

на соревнованиях по легкой атлетике в манеже (например, с внутренней на внешнюю). Результаты анализа продемонстрировали наличие умеренной обратной связи между номером дорожки и силой давления. Это означало, что для изменения дорожки в забеге в сторону увеличения номера – то есть, перемещение от центра виражка – характерна тенденция к уменьшению силы давления на опору. При этом с увеличением номера дорожки наблюдалось уменьшение силы давления как на левую, так и на правую ногу.

На основании полученных уравнений регрессии проведена количественная оценка этих изменений, выявлены различия в силе давления ногами, а также предложены возможные интерпретации наблюдаемых зависимостей, связанные с изменением радиуса кривизны и биомеханики бега.

Установлено, что для левой ноги в соответствии с уравнением $Y = -23,966 * X + 257,855$ (где X – номер дорожки) изменение номера дорожки с увеличением на единицу приводило к уменьшению силы давления на $23,966 \text{ кгс/см}^2$. Для правой ноги, исходя из результатов расчета по уравнению $Y = -16,235 * X + 289,742$, при увеличении номера дорожки на единицу сила давления на правую ногу должна была уменьшиться на $16,235 \text{ кгс/см}^2$. Изменение дорожки в обратную сторону (к центру) предполагало, наоборот, повышение влияния центробежной силы и связанных с ней перегрузок.

Полученные формулы позволяют осуществлять оценку разницы в силе давления на опору в спринтерском беге по виражу для каждой дорожки, нужно только подставить значения (номер дорожки) в уравнение регрессии.

Так, для левой ноги разработанные уравнения будут выглядеть следующим образом: на первой дорожке: $Y_{л1} = -23,966 * 1 + 257,855 = 233,889 \text{ кгс/см}^2$; на четвертой дорожке: $Y_{л4} = -23,966 * 4 + 257,855 = 162,981 \text{ кгс/см}^2$.

Исходя из полученных данных, снижение нагрузки от компоненты центробежной силы на левую ногу составило $70,908 \text{ кгс/см}^2$, то есть – 30%.

Исходя из расчетов показателей силы давления для правой ноги: на первой дорожке $Y_{п1} = -16,235 * 1 + 289,742 = 273,507 \text{ кгс/см}^2$, а на четвертой дорожке $Y_{п4} = -16,235 * 4 + 289,742 = 224,702 \text{ кгс/см}^2$. При этом уменьшение силы давления составило $48,805 \text{ кгс/см}^2$.

Согласно модели, при переходе с 1-й на 4-ю дорожку большим изменениям подвержены динамические показатели левой ноги, чем правой – на $22,103 \text{ кгс/см}^2$ (31,2%). То есть, несмотря на уменьшение влияния центробежной силы и разницы в силе давления ног, способствующих снижению сложности динамических и пространственных дифференцировок для стабилизации положения тела в беге, выше-перечисленные изменения специфичны для каждой дорожки и требуют своевременной координационной перестройки, определяющей эффективность темпо-ритмовой структуры спринтерского бега.

Учитывая, что представленные модели регрессии объясняли примерно 13% дисперсии силы давления, далее изучались факторы, не учтенные в данной модели, такие как антропометрические. Это было обусловлено тем, что в современном спорте высших достижений учет особенностей спортсмена является основным условием успешности реализации процесса формирования его спортивной формы. При этом без индивидуализации средств и методов управления деятельностью спортсменов в беге на короткие дистанции невозможна коррекция его темпо-ритмовой структуры. Только понимание взаимосвязи всей совокупности факторов позволяет осуществить индивидуализацию тренировочных программ, направленных

на совершенствование техники спринтерского бега по виражу в условиях манежа и, как следствие, повышение результативности соревновательной деятельности. Поэтому в процессе проектирования регрессивных моделей силы давления на опору в спринтерском беге по виражу были учтены значимые антропометрические факторы, оказывающие влияние на данные динамические характеристики техники движений спортсмена. Для решения данной задачи были выполнены антропометрические измерения испытуемых и получены такие индивидуальные параметры, как вес, рост, длина голени и длина руки, длина стопы, длина бедра и длина туловища.

Последовательность разработки многофакторной регрессионной модели, описывающей зависимость силы давления левой ногой в спринтерском беге по прямой от указанных параметров, можно представить в виде технологической цепочки.

Первоначально было составлено уравнение многофакторной модели для выполнения регрессионного анализа силы давления на опору в беге по прямой легкоатлетов-спринтеров, имеющих различия в антропометрических данных. Оно имело следующий вид: $F = b_0 + b_1*x_1 + b_2*x_2 + b_3*x_3 + b_4*x_4$, где: F – сила давления на опору ($\text{кгс}/\text{см}^2$); x_1 – вес (кг); x_2 – рост (см); x_3 – длина голени (см); x_4 – длина руки (см); b_0 – свободный член (константа); b_1, b_2, b_3, b_4 – коэффициенты чувствительности соответствующих факторов.

Далее определялись величины свободного члена (b_0) и коэффициентов чувствительности каждого фактора (b_1-b_4). Они соответствовали следующим показателям: $b_0 = -821,479$; $b_1 = -0,448$; $b_2 = 10,767$; $b_3 = -76,152$; $b_4 = 11,793$. При этом коэффициент детерминации ($K_d = 1$) указывал на хорошую согласованность полученной модели с исходными данными.

Конкретизированные величины были интегрированы в многофакторную модель регрессионного анализа силы давления на опору левой ногой в беге по прямой с учетом антропометрических данных легкоатлета-спринтера: $F = -821,479 - 0,448*x_1 + 10,767*x_2 - 76,152*x_3 + 11,793*x_4$.

В заключение модель прошла тестирование, продемонстрировав свою информативность.

Проектирование остальных многофакторных моделей регрессионного анализа силы давления на опору в спринтерском беге по прямой и виражу было выполнено с применением такой же технологии (табл. 4).

Регрессионные модели продемонстрировали свою информативность при тестировании на реальных данных, указывая на потенциальную применимость для анализа и прогнозирования силы давления у легкоатлетов-спринтеров в определенных условиях бега по прямой и виражу.

Таблица 4 – Уравнения многофакторных регрессионных моделей силы давления на опору при беге легкоатлетов-спринтеров по прямой и виражу в манеже ($\text{кгс}/\text{см}^2$)

Дорожка / нога	Уравнение
по прямой / левая	$F = -821,479 - 0,448*x_1 + 10,767*x_2 + 76,152*x_3 + 11,793*x_4$
по прямой / правая	$F = 808,555 + 23,105*x_1 + 7,495*x_2 + 108,96*x_3 + 22,196*x_4$
1-я на вираже / левая	$F = -397,39 - 5,703*x_1 + 30,316*x_2 - 84,905*x_3 - 10,399*x_4$
1-я на вираже / правая	$F = 60,752 + 24,272*x_1 + 21,351*x_2 - 125,719*x_3 + 4,422735*x_4$
3-я на вираже / левая	$F = -273,977 + 3,873*x_1 + 20,2144*x_2 + 92,134*x_3 + 11,867*x_4$
3-я на вираже / правая	$F = 256,069 + 12,763*x_1 + 23,388*x_2 + 88,334*x_3 - 20,173*x_4$
5-я на вираже / левая	$F = -59,642 - 4,603*x_1 + 16,847*x_2 - 46,394*x_3 - 7,1713*x_4$
5-я на вираже / правая	$F = 1441,188 + 28,834*x_1 + 0,7416*x_2 - 117,146*x_3 + 31,5611*x_4$

Примечание: F ($\text{кгс}/\text{см}^2$) – сила давления на опору; X_1 – вес (кг); X_2 – рост (см); X_3 – длина голени (см); X_4 – длина руки (см).

Ключевым аспектом дальнейшего исследования в интерпретации полученных моделей является оценка степени влияния каждого из факторов, включенных в анализ, на результативность бега, а также оценка прогностической точности модели в целом.

Заключение. Результаты могут быть использованы для оптимизации тренировочного процесса в спринтерском беге на основе разработки стратегий минимизации негативного влияния криволинейного движения в условиях легкоатлетического манежа. В процессе исследования доказано, что:

- центробежная сила в спринтерском беге по виражу в условиях манежа обуславливает различия в давлении стопами на дорожку;
- увеличение радиуса виражу и уменьшение уклона дорожки в манеже при перемещении с внутренней на внешнюю снижают влияние вертикальной составляющей центробежной силы на тело спортсмена и силу давления стопами на опору;
- сила давления на опору в беге по прямой и виражу зависит от антропометрических особенностей легкоатлета-спринтера;
- разработанные многофакторные регрессионные модели являются информативным инструментом анализа и прогнозирования воздействия центробежной силы на тело легкоатлета-спринтера в условиях бега по виражу на различных дорожках легкоатлетического манежа.

Список источников

1. Евгеньев А. А. Формирование оптимальной темпо-ритмовой структуры бега с максимальной скоростью по повороту и методика ее совершенствования на этапе высшего спортивного мастерства : автореф. дис. ... канд. пед. наук. Санкт-Петербург, 1992. 22 с. EDN: ZKBKVR.
2. Немцев О. Б., Доронин А. М., Чечин А. В. О кинематике стопы в спринтерском беге по повороту // Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта. 2012. № 3 (85). С. 133–136. EDN: OWTWIF.
3. Юшкевич Т. П., Царанков В. Л. Значение контроля в совершенствовании тренировочного процесса легкоатлетов-спринтеров // Ученые записки Белорусского государственного университета физической культуры. 2016. № 19. С. 152–159. EDN: YLTDUD.
4. Шиманский А. А. К проблеме прогнозирования результативности спринтерского бега на 400 м в условиях манежа // Научные исследования и разработки в спорте : вестник аспирантуры и докторантуры. Вып. 33. Санкт-Петербург : НГУ им. П.Ф. Лесгафта, 2025. С. 119–133.
5. The biological limits to running speed are imposed from the ground up / P. G. Weyand, R. F. Sandell, D. N. L. Prime, M. W. Bundle. DOI 10.1152/japplphysiol.00947.2009 // Journal of Applied Physiology. 2010. V. 108. P. 950–961. EDN: NZPGJV.
6. Умаров А. А. Особенности техники бега с максимальной скоростью по виражу // Научный атлетический вестник. 2000. Т. 2, № 1. С. 15–20.

References

1. Evgeniev A. A. (1992), “Formation of the optimal tempo-rhythmic structure of running at maximum speed on a turn and the method of its improvement at the stage of higher sports mastery”, abstract of the dissertation ... candidate of pedagogical sciences, Saint Petersburg, 22 p.
2. Nemtsev O. B., Doronin A. M., Chechin A. V. (2012), “On the Kinematics of the Foot in Sprint Running on a Turn”, *Uchenye Zapiski Universiteta im. P.F. Lesgafta*, No. 3 (85), pp. 133–136.
3. Yushkevich T. P., Tsarkov V. L. (2016), “The Importance of Control in Improving the Training Process of Sprint Athletes”, *Scientific Notes of the Belarusian State University of Physical Culture*, No. 19, pp. 152–159.
4. Shimansky A. A. (2025), “On the problem of predicting the effectiveness of 400 m sprinting in an arena”, *Scientific research and development in sports*, bulletin of postgraduate studies and doctoral studies. Issue 33, St. Petersburg, Lesgaft National State University, pp. 119–133.
5. Weyand P. G., Sandell R. F., Prime D. N. L., Bundle M. W. (2010), “The biological limits to running speed are imposed from the ground up”, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 108, pp. 950–961, DOI 10.1152/japplphysiol.00947.2009.
6. Umarov A. A. (2000), “Features of Running at Maximum Speed on a Curve”, *Scientific Athletic Bulletin*, Vol. 2, No. 1, pp. 15–20.

Информация об авторе:

Шиманский А.А., преподаватель кафедры физической культуры, SPIN-код автора: 5795-7154.

Поступила в редакцию 02.12.2025.

Принята к публикации 15.01.2026.