

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВ ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Научная статья

УДК 685.34.04

EDN KEUGHS

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2026-2-72-5-12>

Татьяна Владимировна Жуковская

Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

zhukovskayatv@corp.knrtu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4006-6691>

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБУВИ КАК ФАКТОР ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАНТАРНОГО АПОНЕВРОЗА

Аннотация. В статье приведено обоснование целевых интервалов статического и динамического коэффициентов трения в системе «внутренняя поверхность обуви – чулочно-носочное изделие – стопа», обеспечивающих функциональную эффективность стопы при ходьбе и сохранение эффективной работы плантарного апоневроза. Статические и динамические коэффициенты трения определяли экспериментально при естественной влажности кожи с применением универсального трибологического прибора. Расчетное обоснование выполнено на основе модели Амонтона – Кулона с физической интерпретацией трения как суммы адгезионной и деформационной составляющих. Установлено, что значения коэффициента трения существенно зависят от волокнистого состава чулочно-носочного изделия и типа материала внутренней поверхности обуви. Введение промежуточного текстильного слоя принципиально изменяет трибологический режим контакта и распределение касательных напряжений. На основе расчетного анализа определены минимально допустимые и функционально целесообразные значения коэффициента трения для пяточной и носочно-пучковой областей стопы.

Ключевые слова: стопа, обувь, материалы внутренней поверхности обуви, коэффициент трения, трибологические характеристики, плантарный апоневроз, внутриобувное проскальзывание

Благодарности: работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (соглашение №10/2025-ПД-КНИТУ от 22.12.2025).

Для цитирования: Жуковская Т. В. Трибологические характеристики материалов внутренней поверхности обуви как фактор функциональной эффективности плантарного апоневроза // Технологии и качество. 2026. № 2(72). С. 5–12. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2026-2-72-5-12>.

Original article

Tatiana V. Zhukovskaya

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF INNER FOOTWEAR SURFACE MATERIALS AS A FACTOR OF PLANTAR APONEUROSIS FUNCTIONAL EFFICIENCY

Abstract. To substantiate target ranges of static and dynamic coefficients of friction in the system “footwear inner surface – hosiery – foot” ensuring functional efficiency of the foot during walking and preservation of plantar aponeurosis performance. Static and dynamic coefficients of friction were determined experimentally

© Жуковская Т. В., 2026

under conditions of natural skin moisture using a universal tribological tester. The computational substantiation was performed based on Amontons-Coulomb model with physical interpretation of friction as a combination of adhesive and deformation components. It was established that the coefficient of friction strongly depends on the fibre composition of hosiery and on the type of material used for footwear inner surface. The introduction of an intermediate textile layer fundamentally alters the tribological contact regime and the distribution of tangential stresses. Based on the computational analysis, minimum admissible and functionally reasonable values of the coefficient of friction were determined for the heel and forefoot regions of the said organ.

Keywords: *foot, shoes, shoe inner surface materials, coefficient of friction, tribological characteristics, plantar aponeurosis, footwear slipping motion*

Acknowledgements: the work is carried out using the grant provided by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to higher education institutions, scientific and other organisations to support plans for human resources development in terms of stimulating their scientific and scientific-pedagogic workers to defend doctoral theses and to carry out scientific research work (agreement No 10/2025-ПД-КНИТУ as of Dec. 22, 2025).

For citation: Zhukovskaya T. V. Tribological characteristics of inner footwear surface materials as a factor of plantar aponeurosis functional efficiency. *Technologies & Quality*. 2026. No 2(72). P. 5–12. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2026-2-72-5-12>.

Внутриобувное взаимодействие стопы с элементами обуви представляет собой сложный многофакторный процесс, в котором механические, в том числе трибологические характеристики материалов [1–4] напрямую влияют на устойчивость, кинематику переката и распределение нагрузок в фазах ходьбы. Одним из ключевых параметров, определяющих условия этого взаимодействия, является коэффициент трения в системе «внутренняя поверхность обуви – чулочно-носочное изделие – стопа» [5–8].

В большинстве существующих исследований коэффициент трения в данной системе рассматривается преимущественно с точки зрения профилактики повреждений кожи стопы, таких как потертости, мозоли и натоптыши [9]. При этом существенно меньше внимание уделяется его роли как функционального параметра, определяющего условия передачи мышечных усилий, характер микроскольжения (фреттинг-явление) и деформаций мягких тканей, а также эффективность работы стопы, обеспечивающих ее опорную и рессорную функции [10, 11].

Особое значение в этом контексте приобретает плантарный апоневроз (подошвенная фасция из плотной соединительной ткани) [12, 13], играющий ключевую роль в поддержании сводчатого строения стопы и реализации так называемого механизма лебедки (windlass) в фазе отталкивания [14]. Изменение условий трения в контакте «стопа – обувь» влияет на величину касательных напряжений в плантарной части стопы, кинематику переката и, как следствие, на функциональную эффективность данного механизма. Таким образом, как недостаточное сцепление со стелькой, приводящее

к внутриобувному проскальзыванию, так и избыточное трение, вызывающее рост сдвиговых нагрузок, могут рассматриваться как факторы функционального риска.

Дополнительную сложность формированию рациональных трибологических характеристик придает наличие промежуточного текстильного слоя – чулочно-носочного изделия (ЧНИ) [15], которое принципиально изменяет режим трения, соотношение адгезионной и деформационной составляющих, а также микроклимат в зоне контакта кожи стопы с материалами внутренней поверхности обуви (ВПО) [16]. В этой связи коэффициент трения в системе «ВПО – ЧНИ – стопа» целесообразно рассматривать как эффективный параметр граничных условий, подлежащий целенаправленному исследованию и в перспективе управляемому изменению.

Целью настоящего исследования является обоснование целевых интервалов статического и динамического коэффициентов трения в системе «ВПО – ЧНИ – стопа», обеспечивающих компромисс между устойчивостью опоры, предотвращением внутриобувного проскальзывания и ограничением избыточных касательных напряжений в плантарной области стопы при ходьбе. Для достижения поставленной цели выполнено экспериментальное определение коэффициентов трения для характерных пар материалов, проведен расчетный анализ напряженного состояния в зоне контакта с учетом механизма работы плантарного апоневроза и сформулированы функционально обоснованные проектные интервалы коэффициентов пар трения материалов ВПО.

Полученные результаты создают основу для разработки конструктивных и технологических решений, направленных на подбор материалов ВПО с заданными трибологическими характеристиками, а также открывают возможность их целенаправленной поверхностной модификации с учетом функциональных требований к условиям их взаимодействия.

Объектом исследования является трибологическая система «ВПО – ЧНИ – стопа», в рамках которой анализировались характеристики трения при внутриобувном взаимодействии в условиях ходьбы. В качестве материалов внутренней поверхности обуви использовались подкладочные кожи из шкур свиньи, козы, овцы и крупного рогатого скота (КРС), а также подкладочный спилоч и текстильные материалы (байка различной плотности, войлок стелечный, подкладочный мех из шкуры овчины). В качестве чулочно-носочных изделий применялись изделия из трикотажных полотен различного волокнистого состава и поверхностной плотности: полиамидные (п/а), хлопчатобумажные (х/б) и смесовые. В качестве биологического контртела рассматривалась кожа плантарной поверхности стопы, модельным дублером которой выбрана парная свиная шкура [17, 18].

Отбор материалов осуществляли с учетом их практического применения в конструкции обуви и гигиенических требований, предъявляемых к изделиям, контактирующим с кожей стопы.

Самым простым, менее затратным и давно известным способом определения коэффициента трения материалов легкой промышленности является метод наклонной плоскости [19], для автоматизации и повышения точности измерения указанного параметра предлагаются новые способы [20].

Определение статического ($\mu_{\text{стат}}$) и динамического ($\mu_{\text{дин}}$) коэффициентов трения проводили с использованием универсального трибологического прибора MXD-02, предназначенного для измерения коэффициентов трения материалов различной природы, включая кожаные и текстильные материалы, в соответствии со стандартом испытания ISO 8295:2004.

Измерения осуществляли по стандартной схеме скольжения блока по поверхности испытываемого образца при заданной нормальной нагрузке и постоянной скорости перемещения. Статический коэффициент трения определяли по максимальному значению силы трения в момент начала движения блока, динамический – по установившемуся значению силы трения в режиме равномерного скольжения.

Испытания проводили при нагрузке до 5 Н с использованием стандартного блока массой 200 г. Скорость перемещения траверсы составляла 100 мм/мин (по ISO 8295:2004). Погрешность измерений не превышала $\pm 0,5\%$ от измеренного значения. Эксперименты выполняли при нормальных условиях окружающей среды. Перед испытаниями образцы кондиционировали в указанных условиях не менее 24 ч.

Измерения проводили для пар трения «кожа стопы – ЧНИ», «ЧНИ – ВПО» и «кожа стопы – ВПО». Полученные значения $\mu_{\text{стат}}$ и $\mu_{\text{дин}}$ использовались в качестве исходных данных для формирования граничных условий расчетной модели.

Для расчетного анализа использовалась модель Амонтона – Кулона [21], обеспечивающая корректное описание режима предельного трения и стандартную реализацию в вычислительных пакетах. При этом для физической интерпретации результатов применялась двухкомпонентная трактовка трения [22], учитывающая адгезионную и деформационную составляющие, что является более адекватным для мягких биологических тканей и волокнистых материалов легкой промышленности [23].

Расчеты выполняли для условий ходьбы по ровной поверхности со скоростью 3,5 км/ч для человека массой тела 75 кг и размером обуви 38 (245 мм). Площади контакта пяточной и носочно-пучковой частей стопы определяли по плантограммам и принимали равными 518 и 698 см² соответственно. Полная вертикальная нагрузка на плантарную поверхность стопы составляла 735 Н и распределялась между пяточной и носочно-пучковой зонами в соотношении, принятом равным 1,6 [24].

Для каждой зоны рассчитывали контактное давление, касательную силу и среднее касательное напряжение. Минимально допустимые значения коэффициента трения определяли из условия отсутствия проскальзывания $\tau \leq \mu P$. Для формирования проектных целевых интервалов μ дополнительно вводили функциональный критерий ограничения средних касательных напряжений в зоне контакта.

В качестве базового режима внутриобувного взаимодействия рассматривалось состояние естественной влажности кожи стопы, соответствующее нормальным условиям эксплуатации обуви без искусственного высушивания и без внешнего смачивания. Режимы повышенной гидратации и наличия жидкостной пленки рассматривались как сценарии чувствительности и использовались для качественной оценки устойчивости полученных выводов.

В результате экспериментального определения коэффициентов статического и динамического трения для материалов системы «ВПО – ЧНИ – стопа» установлено, что при естественной влажности кожи значения μ существенно зависят от волокнистого состава чулочно-носочного изделия и типа материала внутренней

поверхности обуви. Полученные данные (табл.) подтверждают, что введение промежуточного текстильного слоя принципиально изменяет трибологический режим контакта по сравнению с прямым взаимодействием кожи стопы и материала подкладки.

Т а б л и ц а

Определение статического и динамического коэффициентов трения материалов системы «ВПО – ЧНИ – стопа»

Первый элемент пары трения	Второй элемент пары трения	$\mu_{\text{стат}}$	$\mu_{\text{дин}}$
Кожа стопы	Трикотаж п/а, 40 г/м ²	0,24	0,18
	Трикотаж х/б, 140 г/м ²	0,52	0,48
	Трикотаж х/б + п/а, 180 г/м ²	0,50	0,48
	Трикотаж шерсть + п/а, 210 г/м ²	0,58	0,53
	Кожа подкладочная (свиная)	0,45	0,42
	Кожа подкладочная (коза)	0,47	0,43
	Кожа подкладочная (овечья)	0,65	0,61
	Кожа подкладочная (КРС)	0,62	0,58
	Кожа подкладочная (спилок)	0,88	0,85
Трикотаж п/а, 40 г/м ²	Кожа подкладочная (свиная)	0,28	0,26
	Кожа подкладочная (коза)	0,33	0,30
	Кожа подкладочная (овечья)	0,38	0,32
	Кожа подкладочная (КРС)	0,34	0,32
	Кожа подкладочная (спилок)	0,75	0,71
	Байка легкая, х/б, 200 г/м ²	0,78	0,75
	Байка суровая, 300 г/м ²	0,82	0,79
	Войлок стелечный, 900 г/м ²	0,92	0,88
	Мех подкладочный, овчина	0,42	0,38
Трикотаж х/б, 140 г/м ²	Кожа подкладочная (свиная)	0,30	0,28
	Кожа подкладочная (коза)	0,37	0,34
	Кожа подкладочная (овечья)	0,40	0,37
	Кожа подкладочная (КРС)	0,42	0,38
	Кожа подкладочная (спилок)	0,82	0,79
	Байка легкая, х/б, 200 г/м ²	0,78	0,75
	Байка суровая, 300 г/м ²	0,80	0,78
	Войлок стелечный, 900 г/м ²	0,88	0,88
	Мех подкладочный (овчина)	0,40	0,36
Трикотаж х/б + п/а, 180 г/м ²	Байка легкая, х/б, 200 г/м ²	0,78	0,75
	Байка суровая, 300 г/м ²	0,82	0,80
	Войлок стелечный, 900 г/м ²	0,95	0,92
	Мех подкладочный, (овчина)	0,38	0,36
Трикотаж шерсть + п/а, 210 г/м ²	Байка легкая, х/б, 200 г/м ²	0,86	0,82
	Байка суровая, 300 г/м ²	0,98	0,93
	Войлок стелечный, 900 г/м ²	1,25	1,10
	Мех подкладочный (овчина)	0,56	0,52

Для контакта «кожа стопы – ЧНИ» минимальные значения $\mu_{\text{стат}}$ и $\mu_{\text{дин}}$ характерны для тонкого полиамидного (п/а) трикотажа, что указывает на снижение адгезионной составляющей трения и уменьшение сопротивления относительным микродвигам. Хлопчатобумажные (х/б) и шерстяные трикотажные полотна, напротив, обеспечивают более высокий уровень сцепления, обусловленный как повышенной реальной площадью контакта, так и возрастанием деформационного вклада вследствие большей сжимаемости волокнистой структуры.

В паре «ЧНИ – ВПО» наибольшие значения коэффициента трения наблюдаются при взаимодействии с ворсистыми и объемными

материалами (байка, войлок), а также со спилком. Это свидетельствует о доминировании деформационной составляющей трения и росте площади микроконтактов при контактном давлении, характерном для условий ходьбы. В то же время подкладочный мех из шкуры овчины демонстрирует более низкие значения μ , что, вероятно, связано с наличием мягкого и относительно длинного ворса, способного частично перераспределять касательные напряжения и снижать эффективное сцепление.

Для количественного обоснования целевых значений коэффициента трения выполнен расчет напряженного состояния в контакте «стопа – стелька» с учетом особенностей рабо-

ты плантарного апоневроза. При выбранных параметрах движения (скорость 3,5 км/ч, масса тела 75 кг) и распределении нагрузки между пяточной и носочно-пучковой областями установлено, что минимально допустимые значения коэффициента трения, определяемые из условия отсутствия проскальзывания ($\tau \leq \mu P$), составляют $\mu_{\text{пч мин}} = 0,21$ и $\mu_{\text{пч мин}} = 0,29$. Эти значения характеризуют лишь нижнюю границу сцепления и не могут рассматриваться как проектные, поскольку не учитывают влияние избыточных касательных напряжений на функциональное состояние мягких тканей стопы.

Для перехода к проектным интервалам введен функциональный критерий ограничения средних касательных напряжений в зоне контакта. В качестве целевых значений для базового внутриобувного взаимодействия приняты интервалы $\tau_{\text{пч}} = 20...26$ кПа для носочно-пучковой части и $\tau_{\text{пч}} = 30...35$ кПа для пяточной части стопы. Такой выбор обусловлен необходимостью, с одной стороны, обеспечить устойчивость (предотвратить паразитное проскальзывание) пяточной части стопы в фазе ранней опоры, а с другой – ограничить сдвиговые деформации в переднем отделе стопы в фазе отталкивания, где реализуется механизм «лебёдки» (windlass) плантарного апоневроза.

При рассчитанных значениях контактного давления указанные интервалы касательных напряжений соответствуют целевым диапазонам эффективного коэффициента трения $\mu_{\text{пч эф}} = 0,30...0,40$ и $\mu_{\text{пч эф}} = 0,55...0,65$. Полученные значения отражают компромисс между необходимым сцеплением для предотвращения внутриобувного проскальзывания и ограничением избыточных сдвиговых нагрузок, способных нарушать кинематику переката и снижать функциональную эффективность работы стопы в целом и плантарного апоневроза в частности.

Сопоставление рассчитанных целевых интервалов μ с экспериментальными данными позволяет сформулировать практические рекомендации по зональной коррекции трибологических характеристик материалов ВПО. Для подкладочных кож из шкур свиньи и козы целесообразно повышение коэффициента трения в пяточной части стельки, тогда как для кож из шкур овцы и крупного рогатого скота в летней обуви, предназначенной для ношения без ЧНИ, рекомендуется снижение μ в носочно-пучковой зоне. Для подкладочного спилка, а также для объемных текстильных материалов (байка, войлок) требуется понижающая коррекция коэффициента трения по всей поверхности, особенно

в переднем отделе стельки. Подкладочный мех из шкуры овчины занимает промежуточное положение: при относительно умеренных значениях μ в переднем отделе рационально повышенные сцепления в пяточной зоне для снижения риска паразитного проскальзывания стопы.

ВЫВОДЫ

1. В работе обоснована целесообразность рассмотрения коэффициента трения в системе «внутренняя поверхность обуви – чулочно-носочное изделие – стопа» не только как фактора профилактики повреждений кожи, но и как функционального параметра, определяющего условия реализации опорной, рессорной и толчковой функций стопы, а также эффективность работы плантарного апоневроза в фазах опоры и отталкивания при ходьбе.

2. Экспериментально показано, что при естественной влажности кожи значения статического и динамического коэффициентов трения существенно зависят от волокнистого состава чулочно-носочного изделия и типа материала внутренней поверхности обуви. Введение промежуточного текстильного слоя принципиально изменяет трибологический режим контакта за счет перераспределения адгезионной и деформационной составляющих трения.

3. На основе аналитического расчета напряженного состояния в контакте «стопа – ВПО» с учетом особенностей работы плантарного апоневроза установлено, что минимальные значения коэффициента трения, определяемые из условия отсутствия проскальзывания, не могут рассматриваться как проектные, поскольку не учитывают влияние избыточных касательных напряжений на поверхность стопы и кинематику переката.

4. Введен функциональный критерий ограничения средних касательных напряжений в зоне контакта, позволяющий перейти от минимально допустимых значений коэффициента трения к проектным целевым интервалам. Для базового внутриобувного взаимодействия обоснованы целевые диапазоны эффективного коэффициента трения:

- для носочно-пучковой части стопы $\mu_{\text{пч эф}} = 0,30...0,40$;
- для пяточной части стопы $\mu_{\text{пч эф}} = 0,55...0,65$.

5. Показано, что указанные интервалы обеспечивают компромисс между необходимым сцеплением для стабилизации стопы в фазе ранней опоры, предотвращением внутриобувного проскальзывания и ограничением избыточных сдвиговых нагрузок в переднем отделе стопы в фазе отталкивания, что соответствует услови-

ям сохранения функциональной эффективности плантарного апоневроза при ходьбе.

6. Сопоставление целевых интервалов коэффициента трения с экспериментальными данными позволило сформулировать практические рекомендации по зонированию трибологи-

ческих характеристик материалов внутренней поверхности обуви в зависимости от типа подкладочного материала и условий эксплуатации, что может быть использовано при проектировании обуви различного назначения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Александров С. П., Жуковская Т. В. Фреттинг в системе стопа – обувь в фазе переднего толчка и конструктивная превентивность // Известия вузов. Технология легкой промышленности. 2013. Т. 21, № 3. С. 64–66.
2. Rushton R., Richie D. Friction blisters of the feet: a new paradigm to explain causation // *Journal of Athletic Training*. 2024. No. 59(1). P. 1–7.
3. The Effect of Spandex Anti-Friction Pad on Satisfaction, Pain, and Ability of Walking in Transtibial Amputees: A Pilot Study / E. Abolhasani, G. Aminian, R. Baghaei, Z. Jiraiice // *Archives of Rehabilitation*. 2025. Vol. 26, is. 3. P. 344–359.
4. A review of the plantar pressure distribution effects from insole materials and at different walking speeds / F. Haris, B.-Y. Liao, Y.-K. Jan, V. B. H. Akbari, Y. Primanda, K.-H. Lin, C.-W. Lung // *Applied Sciences*. 2021. No. 11(24). P. 138–151.
5. Taron D. N., Thurston T. J., Carré M. J. Frictional behavior of running sock textiles against plantar skin // *Procedia engineering*. 2015. No. 112. P. 110–115.
6. Tribology of the sock-skin interface – the influence of different fabric parameters on sock friction / I. J. DeBois, E. Agarwal, A. Kapoor, K. Mathur // *Journal of Foot and Ankle Research*. 2022. No. 15(1). P. 61.
7. Effects of midsole hardness on the mechanical response characteristics of the plantar fascia during running / X. Zhu, J. Liu, H. Liu, J. Liu, Y. Yang, H. Wang // *Bioengineering*. 2023. No. 10(5). 533 p.
8. Srivastava A. K., Rathore J. S., Shrivastava S. Multidimensional outline of experimental techniques for human skin tribology: a scoping review // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C : Journal of Mechanical Engineering Science*. 2024. No. 238(10). P. 4253–4269.
9. Rushton R., Richie D. Friction blisters of the feet: a critical assessment of current prevention strategies // *Journal of Athletic Training*. 2024. No. 59(1). P. 8–21.
10. Temel M., Johnson A. A., Lloyd A. B. Body mapping of skin friction coefficient and tactile perception during the dynamic skin-textile interaction // *Ergonomics*. 2023. No. 66(10). P. 1449–1464.
11. Kim W., Voloshin A. S. Role of plantar fascia in the load bearing capacity of the human foot // *Journal of biomechanics*. 1995. No. 28(9). P. 1025–1033.
12. A dynamic model of the windlass mechanism of the foot: evidence for early stance phase preloading of the plantar aponeurosis / P. Caravaggi, T. Pataky, J. Y. Goulermas, R. Savage, R. Crompton // *Journal of Experimental Biology*. 2009. No. 212(15). P. 2491–2499.
13. Effects of plantar fascia stiffness on the internal mechanics of idiopathic pes cavus by finite element analysis: Implications for metatarsalgia / X. Cen, Y. Song, P. Yu, D. Sun, J. Simon, I. Bíró, Y. Gu // *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2024. No. 27(14). P. 1961–1969.
14. Wang C., Ni P. Plantar pressure measurement systems in sports biomechanics: a review of sensor technologies and applications for performance and injury analysis // *Sensor Review*. 2026. No. 46(2). P. 186–206.
15. Analysis of current running sock structures with regard to blister prevention / E. Baussan, M. A. Bueno, R. M. Rossi, S. Derler // *Textile Research Journal*. 2013. No. 83(8). P. 836–848.
16. Effect of insole and sock materials on walking plantar pressure in diabetic patients / Y. Ch. Tsai, Sh. L. Chang, S. W. Yang, Sh. M. Lai // *Journal of Biomechanics*. 2007. No. 40(2). P. 448.
17. New methods for evaluating physical and thermal comfort properties of orthotic materials used in insoles for patients with diabetes / W. T. Lo, K. L. Yick, S. P. Ng, J. Yip // *Journal of rehabilitation research and development*. 2014. No. 51(2). P. 311–324.
18. Mechanical response of pig skin under dynamic tensile loading / J. Lim, J. Hong, W. W. Chen, T. Weerasooriya // *International Journal of Impact Engineering*. 2011. No. 38(2-3). P. 130–135.
19. Merder T. H. Coefficient of Friction of Fabrics // *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 1930. No. 5(2). P. 243–249.

20. Лапшин В. В., Замышляева В. В. Автоматизированное устройство для определения тангенциального сопротивления текстильных материалов // Технологии и качество. 2020. № 4(50). С. 3–6.
21. Popova E., Popov V. L. The research works of Coulomb and Amontons and generalized laws of friction // Friction. 2015. No. 3(2). P. 183–190.
22. Bowden F. P., Tabor D. Friction, lubrication and wear: a survey of work during the last decade // British Journal of Applied Physics. 1966. No. 17(12). P. 1521.
23. Tabor D. Friction – the present state of our understanding // Journal of lubrication technology. 1981. No. 103(2). P. 169–179.
24. Hu C., Zhang Y., Gu Y. Longitudinal Plantar Pressure Variation during Gait Throughout Pregnancy // International Conference on Education, Management, Commerce and Society (EMCS-15), January 2015. Zhengzhou : Atlantis Press, 2015. P. 715–718.

REFERENCES

1. Alexandrov S. P., Zhukovskaya T. V. Fretting in the foot – shoe system in the forward thrust phase and constructive prevention. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tekhnologiya lyogkoj promyshlennosti* [The News of higher educational institutions. Technology of Light Industry]. 2013;21(3):64–66. (In Russ.)
2. Rushton R., Richie D. Friction blisters of the feet: a new paradigm to explain causation. *Journal of Athletic Training*. 2024;59(1):1–7.
3. Abolhasani E., Aminian G., Baghaei R., Jiriaiee Z. The Effect of Spandex Anti-Friction Pad on Satisfaction, Pain, and Ability of Walking in Transtibial Amputees: A Pilot Study. *Archives of Rehabilitation*. 2025;26(3):344–359.
4. Haris F., Liao B.-Y., Jan Y.-K., Akbari V. B. H., Primanda Y., Lin K.-H., Lung C.-W. A review of the plantar pressure distribution effects from insole materials and at different walking speeds. *Applied Sciences*. 2021;11(24):138–151.
5. Taron D. N., Thurston T. J., Carré M. J. Frictional behavior of running sock textiles against plantar skin. *Procedia engineering*. 2015;112:110–115.
6. DeBois I. J., Agarwal E., Kapoor A., Mathur K. Tribology of the sock-skin interface – the influence of different fabric parameters on sock friction. *Journal of Foot and Ankle Research*. 2022;15(1):61.
7. Zhu X., Liu J., Liu H., Liu J., Yang Y., Wang H. Effects of midsole hardness on the mechanical response characteristics of the plantar fascia during running. *Bioengineering*. 2023;10(5):533.
8. Srivastava A. K., Rathore J. S., Shrivastava S. Multidimensional outline of experimental techniques for human skin tribology: a scoping review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2024;238(10):4253–4269.
9. Rushton R., Richie D. Friction blisters of the feet: a critical assessment of current prevention strategies. *Journal of Athletic Training*. 2024;59(1):8–21.
10. Temel M., Johnson A. A., Lloyd A. B. Body mapping of skin friction coefficient and tactile perception during the dynamic skin-textile interaction. *Ergonomics*. 2023;66(10):1449–1464.
11. Kim W., Voloshin A. S. Role of plantar fascia in the load bearing capacity of the human foot. *Journal of biomechanics*. 1995;28(9):1025–1033.
12. Caravaggi P., Pataky T., Goulermas J. Y., Savage R., Crompton R. A dynamic model of the windlass mechanism of the foot: evidence for early stance phase preloading of the plantar aponeurosis. *Journal of Experimental Biology*. 2009;212(15):2491–2499.
13. Cen X., Song Y., Yu P., Sun D., Simon J., Bíró I., Gu Y. Effects of plantar fascia stiffness on the internal mechanics of idiopathic pes cavus by finite element analysis: Implications for metatarsalgia. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2024;27(14):1961–1969.
14. Wang C., Ni P. Plantar pressure measurement systems in sports biomechanics: a review of sensor technologies and applications for performance and injury analysis. *Sensor Review*. 2026;46(2):186–206.
15. Baussan E., Bueno M. A., Rossi R. M., Derler S. Analysis of current running sock structures with regard to blister prevention. *Textile Research Journal*. 2013;83(8):836–848.
16. Tsai Y. Ch., Chang Sh. L., Yang S. W., Lai Sh. M. Effect of insole and sock materials on walking plantar pressure in diabetic patients. *Journal of Biomechanics*. 2007;40(2):448.
17. Lo W. T., Yick K. L., Ng S. P., Yip J. New methods for evaluating physical and thermal comfort properties of orthotic materials used in insoles for patients with diabetes. *Journal of rehabilitation research and development*. 2014;51(2):311–324.

18. Lim J., Hong J., Chen W.W., Weerasooriya T. Mechanical response of pig skin under dynamic tensile loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2011;38(2-3):130–135.
19. Merder T. H. Coefficient of Friction of Fabrics. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 1930;5(2):243–249.
20. Lapshin V. V., Zamyishlyayeva V. V. Automated device for determining the tangential resistance of textile materials. *Tekhnologii I kachestvo* [Technologies and Quality]. 2020;4(50):3–6. (In Russ.)
21. Popova E., Popov V. L. The research works of Coulomb and Amontons and generalized laws of friction. *Friction*. 2015;3(2):183–190.
22. Bowden F. P., Tabor D. Friction, lubrication and wear: a survey of work during the last decade. *British Journal of Applied Physics*. 1966;17(12):1521.
23. Tabor D. Friction – the present state of our understanding. *Journal of lubrication technology*. 1981;103(2):169–179.
24. Hu C., Zhang Y., Gu Y. Longitudinal Plantar Pressure Variation during Gait Throughout Pregnancy. *International Conference on Education, Management, Commerce and Society (EMCS-15)*, January 2015. Zhengzhou, Atlantis Press, 2015. P. 715–718.

Статья поступила в редакцию 02.02.2026
Принята к публикации 27.04.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Т. В. Жуковская, кандидат технических наук, доцент