

Разработка методики определения пятна контакта подошвы обуви с опорной поверхностью

А. Н. Радюк, Т. М. Борисова,
М. А. Нейфельд, А. Н. Буркин

Витебский государственный технологический университет,
Республика Беларусь

Аннотация. Как известно, детали, находящиеся между стопой и опорной поверхностью (землей, полом) – детали низа, в процессе носки обуви подвергаются наибольшему воздействию. В обычных конструкциях обуви значительную работу выполняет подошва. Она работает на истирание и повторные изгибы. Имеющиеся исследования работы подошвы в процессе носки обуви показали, что ее разрушение связано с величиной удельных давлений, возникающих в зоне контакта подошвы с опорой. Немаловажным фактом является то, что касание двух тел всегда дискретно, т. е. происходит на отдельных пятнах касания, размер и количество которых зависит от нормальных и касательных напряжений, упругих свойств контактируемых тел и от шероховатости их поверхностей. Установление удельного давления в наружном слое подошвы обуви и пятна касания (контакта) является актуальной задачей, так как данные параметры влияют на интенсивность и механизм износа.

Целью исследования является разработка методики определения пятна контакта подошвы обуви с опорной поверхностью, позволяющая установить площадь фактического контакта и рассчитать удельное давление в зоне контакта подошвы с опорой.

В результате работы разработана методика определения фактического пятна контакта подошвы обуви с опорной поверхностью, установлена площадь фактического контакта и рассчитаны удельные давления в зоне контакта подошвы с опорой. Проведен анализ полученных значений, установлено, что с увеличением нагрузки увеличивается площадь фактического отпечатка и соответственно отношение величины площади фактического отпечатка к номинальной площади. Для большинства образцов с увеличением нагрузки увеличивается удельное давление в зоне контакта подошвы с опорой, отношения площади фактического контакта к номинальной площади касания соответствует известным значениям. Разработанная методика и полученные результаты исследования позволяют в совокупности прогнозировать механизм износа для исследованных образцов.

Ключевые слова: пятно контакта, площадь касания, удельное давление, отпечаток ходовой поверхности, методика определения.

Информация о статье: поступила 24 февраля 2025 года.

Development of a method for determining the contact spot of the shoe sole with the supporting surface

Anastasia N. Radyuk, Tatsiana M. Borisova,
Maria A. Neufeld, Alexander N. Burkin

Vitebsk State Technological University,
Republic of Belarus

Abstract. Relevance. As it is known, the parts that are between the foot and the supporting surface (e.g. ground, floor) – commonly referred to as shoe bottom – in the process of wearing shoes are subjected to the greatest impact. In conventional shoe constructions, the sole bears significant mechanical loads, including abrasion and cyclic bending. Prior studies of sole behavior during wear show that its destruction is associated with the value of specific pressures arising in the contact zone of the sole with the support. A critical consideration is that the contact between two bodies is always discrete, i. e. it occurs on separate spots of contact, whose size and number depend on the normal and tangential stresses, elastic properties of the contacted bodies and surface roughness. Determining the specific pressure in the outer layer of the shoe sole and the spot of contact is essential, as these parameters govern the intensity and wear mechanism.

The aim of the research is to develop a methodology for determining the contact spot of the shoe sole with the support

surface, to measure the area of actual contact, and to calculate the specific pressure in the contact zone of the sole with the support.

As a result of the work, a technique for determining the actual spot of contact of a shoe sole with a support surface was developed; the area of actual contact was determined and specific pressure in the contact zone of the sole with a support was calculated. Analysis of the values revealed that with increasing load the area of the actual indentation increases and, accordingly, the ratio of the value of the area of the actual indentation to the nominal area. For the majority of specimens, it was found that with increasing load, the specific pressure in the contact area of the sole with the support increases, and the ratio of the actual contact area to the nominal touching area corresponds to the known values. The developed methodology and findings allow the prediction of the wear mechanism for the tested samples.

Keywords: contact spot, contact area, specific pressure, running surface imprint, method of determination.

Article info: received February 24, 2025.

Введение

Обувь должна быть сконструирована так, чтобы обеспечивать хорошую поддержку и защиту стопы (Kim, I.-J., Smith, R., & Nagata, H., 2001; Kim, I.-J., 2015), обеспечивать безопасность и комфорт, а также повышать производительность во время различных видов деятельности (Kim, I.-J., 2016). Также обувь должна обеспечивать эффективное сцепление или сопротивление скольжению в любой ситуации (Kim, I.-J., 2015; Kim, I.-J., 2016) и иметь подошвы и каблуки с высокими характеристиками сопротивления скольжению (Kim, I.-J., Smith, R., & Nagata, H., 2001).

Известно, что при эксплуатации обуви контакт с ее опорной поверхностью, другими предметами и ногами человека носит постоянный характер. В результате поверхность трущихся деталей разрушается, изнашивается. Наиболее существенен этот износ для подошв и каблуков, так как при ходьбе именно эти детали низа обуви подвергаются истиранию и образованию разрывов, которые изменяют первоначальные топографические структуры (микро- и макро-рисунки протектора) поверхности обуви (Kim, I.-J., 2016). Прогрессирующий износ подошвы и каблука обуви, в свою очередь, влияет на характеристики сопротивления скольжению (Kim, I.-J., Smith, R., & Nagata, H., 2001).

Способность обуви противостоять скольжению в значительной степени влияет на утомляемость при ходьбе (Л. Л. Никитина, Т. В. Жуковская, Р. М. Галялутдинова, 2012). Сцепление низа обуви с грунтом (Л. Л. Никитина, Т. В. Жуковская, Р. М. Галялутдинова, 2012) и способность воспринимать динамические и статические нагрузки (биомеханические свойства) (Л. Л. Никитина, О. Е. Гаврилова, 2012) зависят от материала подошвы и набойки, вида грунта, рационального рифления подо-

швы, опорной поверхности каблука и др. (Л. Л. Никитина, Т. В. Жуковская, Р. М. Галялутдинова, 2012; Л. Л. Никитина, О. Е. Гаврилова, 2012).

Биомеханические свойства обуви в основном определяются показателями параметров амортизационных и фрикционных свойства низа обуви. Амортизационные свойства низа обуви характеризуют способность деталей низа ослаблять ударные нагрузки при ходьбе человека и рассредоточивать давление стопы на опорную поверхность, фрикционные свойства – устойчивость обуви на скользкой поверхности (Л. Л. Никитина, Т. В. Жуковская, Р. М. Галялутдинова, 2012; Л. Л. Никитина, О. Е. Гаврилова, 2012).

Биомеханика ходьбы человека оказывает большое влияние на характер сцепления подошвы обуви с опорной поверхностью. В процессе ходьбы происходит распределение давления на разные участки подошвы, что влияет на площадь фактического контакта ходовой части подошвы с поверхностью грунта (В. А. Харина, 2022).

Фактическая площадь касания определяется величиной номинальных давлений, упругими свойствами и шероховатостью контактируемых поверхностей. В трибологии принято считать, что фактическая площадь контакта намного меньше номинальной площади (Ciavarella M., Joe J., Papangelo A. and Barber J. R., 2019). Так площадь фактического контакта составляет от 0,0001 до 0,1 номинальной площади касания. Даже с учетом высоких нагрузок площадь фактического контакта не превышает 40 % номинальной площади (Н. Г. Полюшкин, 2013).

Известно, что на величину площади фактического контакта влияет рисунок рельефа ходовой поверхности подошвы, эластичность подошвенного материала, сила давления на стопу во время ходьбы, вид и состояние опорной поверхности. Так, площадь фактического кон-

такта увеличивается с повышением нагрузки на подошву и уменьшением неровностей на опорной поверхности, и уменьшается с увеличением модуля упругости подошвенных материалов (Н. Д. Закатова, Е. Я. Михеева, 1989; В.А. Харина, 2022).

Номинальная площадь касания представляет собой зоны, в которых концентрируются пятна фактического касания. Для подошвы это площадь отпечатка на опоре в момент ступания. Номинальная площадь касания зависит от нагрузки, особенностей строения стопы, толщины и модуля упругости подошвы и всех деталей низа и т. д. (Н. Д. Закатова, Е. Я. Михеева, 1989).

Контактное давление и фактическая площадь контакта играют существенную роль в механизмах сухого трения, скольжения и абразивного износа (Afferrante L., Carbone G., Demelio G., 2012). Так основной разрушающей силой при изнашивании подошвы при всех условиях носки являются удельные давления, возникающие в зоне контакта подошвы с опорой при ходьбе и беге, величина которых, вследствие особенностей строения стопы, неодинакова в различных участках ходовой стороны подошвы, что приводит к ее неравномерному изнашиванию (Н. Д. Закатова, Е. Я. Михеева, 1989).

Удельное давление колеблется в довольно широких пределах: обычно оно составляет 4–7 кгс/см² в передней (носочной) части подошвы и около 2 кгс/см² – в пучковой (М. Г. Любич, 1966; Ю. П. Зыбин, В. М. Ключникова, Т. С. Кочеткова, В. А. Фукин, 1982; В. В. Костылева, В. М. Ключникова, 2025). Чем больше удельное давление, тем интенсивнее износ. Благодаря неровности ходовой поверхности кожаной подошвы площадь контакта ее с опорой [при нагрузке 50–60 кгс/см²] составляет около 2–3 % площади касания с опорой и фактическое удельное давление достигает 2 кгс/см² (В. В. Костылева, В. М. Ключникова, 2025)¹.

Согласно данным Платунова К. М., удельные давления для подошвенной кожи в зоне контакта подошвы с опорой в процессе носки имеют величины порядка 4–7 кгс/см², но в отдельных случаях в носочном участке они достигают 10 кгс/см² (Н. Д. Закатова, Е. Я. Михеева, 1989).

Г. Е. Кутянин экспериментальным путем определял величину пятен действительного контакта подошвы с опорной поверхностью и общую площадь этих пятен под нагрузкой методом непосредственного наблюдения.

Образцы кожи для подошв прижимались к призме под давлением 5,7 кгс/см², микрофотографии полученных отпечатков обрабатывались для оценки площади фактического контакта с опорной поверхностью. Площадь фактического контакта с опорой для ношенной подметки составила 2,1 %, а для новой – 7,6 % от номинальной площади соприкосновения образца со стеклом. Различия в площади контакта могут возникать вследствие увеличения плотности и жесткости кожаной подошвы в процессе носки. Фактические удельные давления в 40–50 раз превышают номинальные, определенные К. М. Платуновым и приближаются к разрушающим для кожи (200–300 кгс/см²) (Н. Д. Закатова, Е. Я. Михеева, 1989).

И. В. Крагельский и Е. Ф. Непомнящий определили, что площадь фактического контакта резины, имеющей при давлении 4 кгс/см² модуль упругости 30 кгс/см², с поверхностью бетонного покрытия составляет 55 % от номинальной площади. Для более гладкой опоры площадь фактического контакта будет еще больше (Н. Д. Закатова, Е. Я. Михеева, 1989).

В указанной выше работе Г. Е. Кутянина площадь фактического контакта с опорной поверхностью определялась с помощью прибора с призмой полного внутреннего отражения (Н. Д. Закатова, Е. Я. Михеева, 1989). Схожие устройства применяются для получения отпечатка стопы с целью выявления плоскостопия и других патологий (А. В. Ключникова и Т. С. Кочеткова, 1991). Фотостопомеры позволяют получить изображение стопы с разных сторон. Например, фотоприбор Ильченко В. З. позволяет определять и фиксировать изображения габаритной зоны стопы с помощью оптической системы и фотоаппарата. Фотоприбор, разработанный в Болгарии, включает в себя оптические системы и фотообъективы. Фотостопомер Зыбина Ю. П. и Фукина В. А. использует метод косо́го ортоскопического проектирования. Стерефотостопометры позволяют получить объемное восприятие объекта. В устройстве для фотометрического исследования стоп² используются осветительные лампы, зеркала и матированная прозрачная опорная

² Устройство для фотометрического исследования стоп: пат. 1219051 СССР, А 61 В5/10 / И.В. Фишкин, М.Ю. Минович ; заявитель и патентообладатель Ивановский государственный медицинский институт им. А.С. Бубнова. – № 1219051 А ; заявл. 1984.05.10; опубл. 1986.03.23. // ВНИИПИ Гос. комитета СССР по делам изобретений и открытий. – 1986. – 4 с.

¹ Исходные единицы измерения – Па – переведены в кгс/см².

поверхность. Прибор³ для определения формы и размеров стопы также предполагает использование фотокамеры, зеркал и осветительных устройств, а устройство для бесконтактного измерения поверхности стопы⁴ работает в системе с ЭВМ.

Существуют программы, позволяющие обрабатывать плантограмму стопы, полученную не только с помощью цифровой фотокамеры, но и изображение стопы, полученное любым другим способом, который позволяет сохранить его на ЭВМ в цифровом виде [Ю. В. Милушкова, Д. Г. Козинец, А. Л. Ковалев, В. Е. Горбачик, 2008].

Описанные в литературе устройства и приборы позволяют получить отпечаток поверхности, но для дискретной оценки всей площади отпечатка, а не только

по внешним его границам, требуется использование специальных программ. Применение указанных выше приборов является затратным способом и имеет ограниченную доступность.

Целью данного исследования является разработка методики определения пятна контакта подошвы обуви с опорной поверхностью, позволяющая установить площадь фактического контакта и рассчитать удельное давление в зоне контакта подошвы с опорой.

Объект, методы и средства исследования

Методика предназначена для определения пятна контакта подошвы обуви с опорной поверхностью с целью дальнейшего расчета площади фактического контакта и удельного давления в зоне контакта подошвы с опорой, а также для оценки влияния рисунка наружной поверхности подошвы (протектора подошвы) обуви на отпечаток ходовой поверхности.

В качестве объекта исследования были выбраны современные формованные полимерные подошвы различных конструкций, используемые в производстве обуви на предприятиях Республики Беларусь. Внешний вид подошв обуви представлен на рисунке 1.

³ Прибор для определения формы и размеров стопы: пат. 991996 СССР, А 43 D1/100 / Н.И. Малец, С.А. Иванов, М.Н. Шерстобоев, Л.И.-О. Адигезалов, А.А. Касаткин. ; заявитель и патентообладатель Ленинградское ПО «Скороход». – № 991996 ; заявл. 1981.08.10; опубл. 1983.01.30. // ВНИИПИ Гос. комитета СССР по делам изобретений и открытий. – 1983. – 4 с.

⁴ Устройство для бесконтактного измерения поверхности стопы и голени: пат. 1586667 СССР, А 43 D 1/02 / А.Г. Комиссаров, Ю.А. Карагезян ; заявитель и патентообладатель Ленинградский институт текстильной и легкой промышленности им. С.М. Кирова. – № 1586667 А1 ; заявл. 1990.23.07; опубл. 1990.08.23. // ВНИИПИ Гос. комитета СССР по делам изобретений и открытий. – 1990. – 10 с.



Рисунок 1 – Внешний вид подошв обуви

Figure 1 – View of shoe soles

Для получения отпечатков, наиболее приближенных к реальным, получаемым при эксплуатации, подшву обуви соединяли с предварительно изготовленным стелечным узлом соответствующего размера и конфигурации с помощью двухстороннего скотча. Для этого использовались конструкции гибких стелечных узлов: стелька основная, полустелька нижняя, геленок. Стелечный узел и его составные части представлены на рисунке 2.

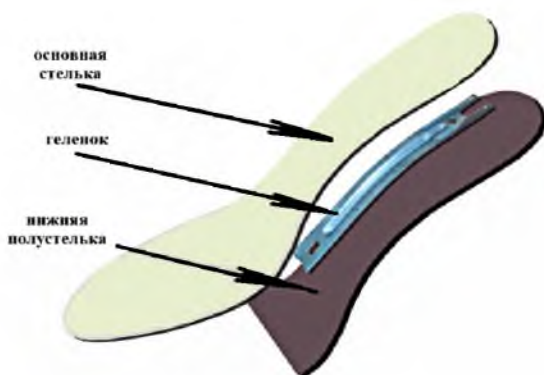


Рисунок 2 – Составные части трехслойного гибкого стелечного узла
Figure 2 – Components of a three-layer flexible insole unit

В качестве материала для основной стельки использовался целлюлозный картон Flexan (Konitex, Словения), для нижней полустельки картон повышенной жесткости Merckens CJM 188 (Merckens, Австрия), геленок – стальной толщиной 1 мм.

Характеристики основной стельки и нижней полустельки для подготовки испытуемого образца представлены в таблице 1.

Для оценки влияния конструкции стелечных узлов на величину фактической площади опоры подошвы, были также использованы стелечные узлы без геленка.

Для определения пятна контакта подошвы с опорной поверхностью использовали следующие приспособления и приборы:

- плантограф, предназначенный для снятия контура и отпечатка и представленный на рисунке 3;
- электроконтактный контурограф, применяемый для обвода габарита подошвы обуви на плантографе и представленный на рисунке 4.

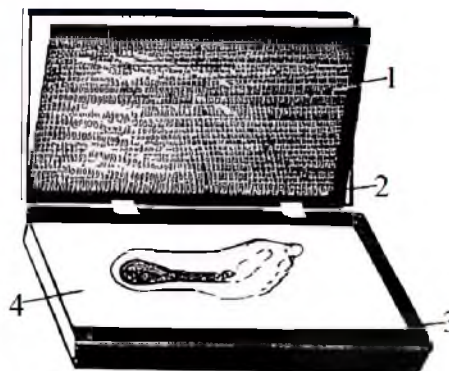


Рисунок 3 – Плантограф для снятия контура и отпечатка
Figure 3 – Plantograph for contour and imprint removal

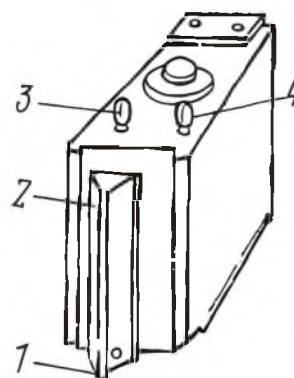


Рисунок 4 – Электроконтактный контурограф
Figure 4 – Electrical contact contour graph

Также применяли поливинилхлоридную пленку, штемпельную краску, лист плотной бумаги.

Плантограф состоит из основания 3 и шарнирно прикрепленной к нему рамки 2 с натянутой поливинилхлоридной пленкой 1. В основание вложена подушечка, на которую наносится штемпельная краска и кладется чистый лист бумаги 4.

Плантограф позволяет получить достаточно четкий и контрастный отпечаток фактической площади контакта подошвы с опорой при наименьших затратах.

Электроконтактный контурограф имеет рабочую часть в виде обводного треугольника 2 с очерчивающей иглой 1. Контроль за величиной давления этого треугольника на стопу обеспечивает электрическая схема, вклю-

Таблица 1 – Показатели физико-механических свойств материалов

Table 1 – Indicators of physical and mechanical properties of materials

Наименование показателя	MERCKENS CJM 188	Flexan
Толщина, мм	2,0	1,75
Плотность, г/см ³	1,06	0,48
Предел прочности при растяжении в сухом состоянии, МПа		
в продольном направлении	38,41	13,83
в поперечном направлении	23,46	6,91
Предел прочности при растяжении после замачивания в воде, МПа		
в продольном направлении	5,24	6,61
в поперечном направлении	2,50	3,91
Относительное удлинение в сухом состоянии, %		
в продольном направлении	9,3	6,2
в поперечном направлении	9,7	11,8
Относительное удлинение в мокром состоянии, %		
в продольном направлении	10,0	7,6
в поперечном направлении	14,2	17,0
Намокаемость за 2 ч., %	66,2	132,00
Изменение линейных размеров при увлажнении, %		
в продольном направлении	2,24	1,5
в поперечном направлении	4,67	1,6
Изменение линейных размеров при высушивании, %		
в продольном направлении	0,96	0,3
в поперечном направлении	1,45	0,5
Жёсткость при статическом изгибе, Н		
в продольном направлении	60,7	23,14
в поперечном направлении	53,38	15,19
Гигроскопичность, %	16,38	28,57
Влагоотдача, %	8,14	19,33

чающая сигнальные лампочки 3 и 4.

В процессе ходьбы происходит распределение давления на разные участки подошвы, что влияет на площадь фактического контакта ходовой части подошвы с поверхностью грунта. Так как на площадь фактического контакта ходовой части подошвы с поверхностью грунта оказывает влияние, как сказано выше, распределение давления на разные участки подошвы в процессе

ходьбы, то необходимо представить фазы ходьбы. Как известно, ходьбу человека условно можно разделить на три фазы (рассмотрим только опорную ногу): 1 фаза – стопа становится на опорную поверхность пяткой; 2 фаза – стопа с пятки перекачивается на всю плантарную поверхность; 3 фаза – стопа с плантарной поверхности переходит на опорную поверхность пальцев ноги для выполнения следующего шага. Представ-

ленные фазы ходьбы не позволяют проанализировать контакт всей ходовой части подошвы с поверхностью грунта, так как это динамическое состояние человека. В связи со сказанным выше немаловажным аспектом методики являлось то, что она рассчитана на определение пятна контакта подошвы обуви с опорной поверхностью в статическом состоянии, т. е. в состоянии покоя (стоя).

Как известно, в статическом состоянии (состояние покоя) ходовая часть подошвы взаимодействует с выступом на опорной поверхности по линии или в точке, что согласуется с теорией Герца. Однако возникновение даже небольшой нагрузки приводит к деформации подошвенного материала вокруг выступа с образованием области касания [В. А. Харина, 2022] – фактического отпечатка подошвы на опоре.

Для снятия отпечатка и получения горизонтальной проекции подошвы обуви выполняли следующий алгоритм:

- на подушечку плантографа наносили штемпельную краску;
- чистый лист плотной бумаги укладывали на подушечку плантографа;
- опускали рамку 2 (рисунок 3) с натянутой поливинилхлоридной пленкой 1;
- подошву обуви устанавливали в плантограф на натянутую пленку;
- испытуемый аккуратно становился на систему подошва + стелечный узел, размещенную на полотне плантографа, переносил вес тела на одну ногу, не смещая и не деформируя его;
- фактический отпечаток подошвы на опоре получали путем обвода контурографом пятна контакта подошвы обуви с опорной поверхностью.

Полученный фактический отпечаток подошвы на опоре по представленному выше алгоритму представлен на рисунке 5. Необходимо отметить, что для участия в исследовании привлекались носочки с различной массой тела, которые носят обувь 37 размера.

Для вычисления величины фактической площади контакта использовался многофункциональный растровый графический редактор Adobe Photoshop 2023.

Предварительно, для загрузки файла в программу цветное изображение с отпечатком подошвы сканировалось при высоком разрешении и сохранялось в формате JPG. С помощью графического редактора определялась площадь фактического отпечатка подошвы контрастного цвета в см². Для каждого образца подо-



Рисунок 5 – Отпечатки ходовой поверхности подошв носочков массой 60 кг и 77 кг

Figure 5 – Footprints of the walking surface of the soles of the wearers weighing 60 kg and 77 kg

швы также получали габаритный контур подошвы, площадь которых вычислялась с помощью САПР АСКО-2Д, предназначенного для проектирования и расчета площадей деталей обуви.

Экспериментальные исследования и обсуждение результатов

Так как Н. Б. Демкин отмечает, что под номинальной площадью касания понимают ту поверхность, при которой соприкасались бы два идеально гладких тела [Н. Б. Демкин, 1970], то номинальная площадь контакта совпадает с площадью номинальных поверхностей и представляет собой в данной работе площадь габарита подошвы обуви.

Значения величины номинальной и фактической площадей контакта, рассчитанные отношения величины площади фактического отпечатка к номинальной площади представлены в таблице 2. Также были рассчитаны удельные давления в зоне контакта подошвы с опорой, которые определялись отношением веса носочка к фактической площади контакта, без учета неравномерности распределения величины давления под различными участками стопы.

Анализируя данные таблицы 2 необходимо отметить, что из-за большого разнообразия вариантов рифления подошв, отношение величины площади фактического отпечатка к номинальной площади колеблется от 12 % до 56 %. Для сравнения результатов данного исследования можно привести исследование, в котором уста-

Таблица 2 – Результаты исследования площади контакта ходовой поверхности подошв с опорной поверхностью

Table 2 – Results of the study of the contact area of the walking surface of the soles with the supporting surface

Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Sn, см ²	159	193	127	247	179	178	177	205	183	164	187	121	105	118
Sф для Н1, см ²	43,9	42,3	36,8	44,6	97,4	44,4	37,5	31,6	67,0	44,9	33,1	15,0	35,1	25,9
Sф для Н2, см ²	60,0	45,9	47,1	52,4	100,8	51,9	52,0	32,9	68,9	71,3	41,4	26,1	52,9	31,1
О для Н1, %	28	22	29	18	54	25	21	15	37	27	18	12	33	22
О для Н2, %	38	24	37	21	56	29	29	16	38	43	22	22	50	26
Уд для Н1, кгс/см ²	1,37	1,42	1,63	1,35	0,62	1,35	1,60	1,90	0,90	1,34	1,81	3,99	1,71	2,31
Уд для Н2, кгс/см ²	1,28	1,68	1,63	1,47	0,76	1,48	1,48	2,34	1,12	1,08	1,86	2,95	1,46	2,47

Примечание: Sn – номинальная площадь контакта; Sф – фактическая площадь контакта; О – отношение величины площади фактического отпечатка к номинальной площади; Уд – удельные давления в зоне контакта подошвы с опорой: Н1 – для носчика с массой тела 60 кг, Н2 – для носчика с массой тела 77 кг.

навливалось «в какой степени подошва стопы обычно контактирует с внешними поверхностями». Участники исследования носили комплект популярной стандартизированной спортивной обуви своего размера, которая была оснащена чувствительными к давлению стельками. Считалось, что площадь контакта определена с высокой точностью и значительно варьировалась от 5 % до 95 % [Cleland L. D., Rowland H. M., Mazza C. and Saal H. P., 2023]. Сравнивая разброс полученных результатов, можно отметить, что в данной работе он гораздо ниже.

Разбежка по величине площадей отпечатков для рассматриваемых подошв также оказалась очень большой – от 15,0 см² до 100,8 см². Соответственно отличаются и величины удельных давлений, наименьшие составили 0,62 кгс/см², наибольшие достигли 3,99 кгс/см². В конструкциях подошв с небольшой величиной фактического отпечатка в зоне контакта с опорой ускоряется износ ходовой поверхности подошвы, уменьшается её сцепление с опорой, что ухудшает фрикционные свойства низа обуви.

При увеличении нагрузки (замене носчика с массой тела 60 кг на носчика с массой тела 77 кг) отношение

величины площади фактического отпечатка к номинальной увеличивается на 2,7–83,3 %. Для всех образцов, кроме образцов № 1, № 7, № 10, № 12 и № 13 удельные давления в зоне контакта подошвы с опорой при увеличении нагрузки также увеличиваются на 2,8–23,5 % (для образца № 3 не изменяется). Для образца № 1 удельное давление снижается на 6,6 %, для образца № 7 на 7,5 %, для образца № 10 – на 19,4 %, для образца № 12 – на 26,0 % и для образца № 13 – на 14,6 %.

Необходимо отметить, что в работе проводилось сравнение площади фактического контакта подошвы с использованием стелечного узла без геленка и с геленком, которое показало, что влияние геленка на величину отпечатка для формованной подошвы практически отсутствует.

Также в работе проводилось сопоставление и сравнение полученных значений отношения величины площади фактического отпечатка к номинальной площади и удельных давлений в зоне контакта подошвы с опорой с известными значениями [М. Г. Любич, 1966; Ю. П. Зыбин, В. М. Ключникова, Т. С. Чочеткова, В. А. Фукин, 1982; В. В. Костылева, В. М. Ключникова, 2025; Н. Д. Закатова,

Е. Я. Михеева, 1989].

При сравнении полученных значений с известными значениями отношения площади фактического контакта к номинальной площади касания установлено, что для большинства образцов значения находятся в рамках известных, однако, как отмечалось выше, площадь фактического контакта не превышает 40 % номинальной площади, что не выполняется для образца № 5 как для носчика с массой тела 60 кг, так и для носчика с массой тела 77 кг, а также для образцов № 10 и № 13 для носчика с массой тела 77 кг. Для образца № 5 это объясняется гладкой поверхностью подошвы обуви, для образца № 10 – «равномерностью» рифления в носочной части и гладкой поверхностью в пяточной части подошвы, для образца № 13 – минимальной высотой и площадью выступов по сравнению с другими образцами. Необходимо также отметить, что так как в работе используется гладкая опора, то площадь фактического контакта может быть больше, как и отношение площади фактического контакта к номинальной площади. С ростом интереса к гибким материалам, таким как резина и полимеры, необходимо учитывать возможность больших контактных отношений, даже в упругом режиме, включая случаи, когда фактический контакт происходит везде, за исключением самых глубоких впадин (выступов) [Ciavarella M., Joe J., Papangelo A. and Barber J. R., 2019]. Считается, что более глубокие канавки и широко разнесенные рисунки уменьшают площадь контакта и улучшают рассеивание тепла, минимизируя износ и повышая долговечность [Xu S., De S., Khaleghian M., Emami A., 2025], однако в этом случае речь идет о крестообразном рисунке ходовой поверхности подошв, который не наблюдается у исследованных подошв обуви.

При сравнении полученных значений с известными значениями удельного давления установлено, что для всех образцов, кроме № 12 и № 14, а также для образца № 8 для носчика с массой тела 77 кг, значения значительно отличаются от установленных. Считается, что к уменьшению удельного давления приводит увеличение поверхности контакта стопы и опоры, что наблюдается при стоянии человека на опоре, соответствующей плантарной поверхности стопы на весу, а также при стоянии стопы на мягкой опоре, принимающей форму плантарной поверхности стопы [Л. Ю. Махоткина, Л. Л. Никитина, О. Е. Гаврилова, 2019]. Необходимо отметить, что удельное давление в зоне контакта подошвы с опорой не является нормируемой величиной и в виду большо-

го разнообразия вариантов рифления подошв может значительно отличаться как между образцами, так и от установленных значений для кожаной и резиновой подошв обуви.

Выводы

В результате проведенных исследований:

- разработана методика определения пятна контакта подошвы обуви с опорной поверхностью, позволяющая установить площадь фактического контакта и рассчитать удельное давление в зоне контакта подошвы с опорой, а также оценить в дальнейшем влияние рисунка наружной поверхности подошвы (протектора подошвы) обуви на отпечаток ходовой поверхности;

- установлена площадь контакта ходовой поверхности подошв с опорной поверхностью и рассчитаны удельные давления в зоне контакта подошвы с опорой, позволяющие в совокупности прогнозировать механизм износа для исследованных образцов;

- установлено, что по мере увеличения нагрузки отношение величины площади фактического отпечатка к номинальной площади также увеличивается, а значения удельного давления ведут так себя не для всех образцов;

- установлено, что значения отношения площади фактического контакта к номинальной площади касания для большинства образцов соответствует известным значениям;

- установлено, что значения удельного давления для всех образцов, кроме № 12 и № 14, а также для образца № 8 для носчика с массой тела 77 кг, значительно отличаются от установленных значений. Это объясняется большим разнообразием вариантов рифления подошв обуви; увеличением поверхности контакта стопы и опоры, так как исследование проводилось в статическом состоянии, т. е. в состоянии покоя (стоя), а известные значения удельного давления получены в процессе носки; а также тем фактом, что значения установлены для кожаной и резиновой подошв обуви, а в данной работе в качестве объекта исследования выступали современные формованные полимерные подошвы обуви.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Демкин, Н.Б. (1970). *Контактирование шероховатых поверхностей*. М.: Наука, СССР.
- Законова, Н.Д., Михеева, Е.Я. (1966). *Эксплуатационные свойства обувных материалов и деталей*. Москва: Легкая индустрия, СССР.
- Зыбин, Ю.П., Ключникова, В.М., Кочеткова, Т.С. и Фукин, В.А. (1982). *Конструирование изделий из кожи*. М.: Легкая и пищевая промышленность, СССР.
- Ключникова, А.В., Кочеткова, Т.С. (1991). *Антропологические и биомеханические основы конструирования изделий из кожи*. Москва: Легпромбытиздат, СССР.
- Костылева, В.В., Ключникова, В.М. (2025). *Конструирование изделий из кожи*. Москва: ИНФРА-М, Российская Федерация.
- Любич, М.Г. (1966). *Товароведение обуви*. М.: Экономика, СССР.
- Махоткина, Л.Ю., Никитина, Л.Л., Гаврилова, О.Е. (2019). *Конструирование изделий легкой промышленности: конструирование изделий из кожи*. М.: ИНФРА-М, Российская Федерация.
- Милушкова, Ю.В., Козинец, Д.Г., Ковалев, А.Л. и Горбачик В.Е. (2008). Автоматизация процесса получения и обработки плантограмм, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, Т. 14, С. 35–40.
- Никитина, Л.Л., Гаврилова, О.Е. (2012). Современные полимерные материалы и эргономические свойства обуви, *Вестник Казанского технологического университета*, Т. 14, С. 139–142.
- Никитина, Л.Л., Жуковская, Т.В., Галялудинова, Р.М. (2012). Полимерные материалы в обуви с улучшенными эргономическими характеристиками, *Вестник Казанского технологического университета*, Т. 7, С. 121–124.
- Полюшкин, Н.Г. (2013). *Основы теории трения, износа и смазки*. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, Российская Федерация.
- Харина, В.А. (2022). *Исследование фрикционных свойств ходовой поверхности подошв и повышение антискользких характеристик обуви*: дисс. канд. техн. наук. Новосибирск: Новосибирский технологический институт (филиал) Российского государственного университета им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство).
- Afferrante, L., Carbone, G., Demelio, G. (2012). Interacting and coalescing Hertzian asperities: A new multisasperity contact model, *Wear*, vol. 278–279, pp. 28–33.
- Ciavarella, M., Joe, J., Papangelo, A. and Barber, J.R. (2019). The role of adhesion in contact mechanics, *Journal of the royal society interface*, vol. 16(151): 20180738.
- Cleland, L.D., Rowland, H.M., Mazza, C. and Saal, H.P. (2023). Complexity of spatio-temporal plantar pressure patterns during everyday behaviours, *Journal of the royal society interface*, vol. 20(203): 20230052.
- Kim, I.-J., Smith, R. and Nagata, H. (2001). Microscopic observations of the progressive wear on shoe surfaces that affect the slip resistance characteristics, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 28(1), pp. 17–29.
- Kim, I.-J. (2015). Wear Observation of Shoe Surfaces: Application for Slip and Fall Safety Assessments, *Tribology Transactions*, vol. 58(3), pp. 407–417.
- Kim, I.-J. (2016). Identifying shoe wear mechanisms and associated tribological characteristics: Importance for slip resistance evaluation, *Wear*, vol. 360–361, pp. 77–86.
- Xu, S., De, S., Khaleghian M. and Emami, A. (2025). Wear Resistance of Additively Manufactured Footwear Soles, *Lubricants*, vol. 13(2):13020089.

REFERENCES

- Demkin, N.B. (1970). *Kontaktirovanie sherohovatykh poverkhnostey* [Contacting of rough surfaces]. Moscow: Nauka, USSR [In Russian].

- Zakatova, N.D., Mikheeva, E.Ya. (1966). *Jekspluatatsionnye svoystva obuvnykh materialov i detalej* [Operational properties of shoe materials and parts]. Moscow: Light industry, USSR (In Russian).
- Zybin, Yu.P., Klyuchnikova, V.M., Kochetkova, T.S. and Fukin, V.A. (1982). *Konstruirovaniye izdelij iz kozhi* [Design of leather goods]. Moscow: Light and food industry, USSR (In Russian).
- Klyuchnikova, A.V., Kochetkova, T. S. (1991). *Antropologicheskie i biomehanicheskie osnovy konstruirovaniya izdelij iz kozhi* [Anthropological and biomechanical foundations of designing leather goods]. Moscow: Legprombytizdat, USSR (In Russian).
- Kostyleva, V.V., Klyuchnikova, V. M. (2025). *Konstruirovaniye izdelij iz kozhi* [Design of leather goods]. Moscow: INFRA-M, Russian Federation (In Russian).
- Lyubich, M.G. (1966). *Tovarovedeniye obuvi* [Commodity science of footwear]. M.: Economy, USSR (In Russian).
- Makhotkina, L.Yu., Nikitina, L.L., Gavrilova, O.E. (2019). *Konstruirovaniye izdelij legkoj promyshlennosti: konstruirovaniye izdelij iz kozhi* [Design of light industry products: design of leather products]. M.: INFRA-M, Russian Federation (In Russian).
- Milyushkova, Yu.V., Kozinets, D.G., Kovalev, A.L. and Gorbachik, V.E. (2008). Automation of the process of obtaining and processing plantograms [Automatizatsiya processa poluchenija i obrabotki plantogramm], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta = Vestnik of the Vitebsk State Technological University*, vol. 14. P. 35–40 (In Russian).
- Nikitina, L.L., Gavrilova, O.E. (2012). Modern polymeric materials and ergonomic properties of footwear [Sovremennye polimernye materialy i ergonomicheskie svoystva obuvi], *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Kazan Technological University*, vol. 14, P. 139–142 (In Russian).
- Nikitina, L.L., Zhukovskaya, T.V., Galyalutdinova, R.M. (2012). Polymer materials in footwear with improved ergonomic characteristics [Polimernye materialy v obuvi s uluchshennymi ergonomicheskimi harakteristikami], *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Kazan Technological University*, vol. 7, pp. 121–124 (In Russian).
- Polyushkin, N.G. (2013). *Osnovy teorii treniya, iznosa i smazki* [Fundamentals of the theory of friction, wear and lubrication]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk state agrarian univ., Russian Federation (In Russian).
- Kharina, V.A. (2022). Study of the friction properties of the walking surface of soles and improving the anti-slip characteristics of shoes: diss. Cand. Sc. [Eng.] [Issledovanie friktsionnykh svoystv hodovoj poverhnosti podoshv i povysheniye antiskol'zhashhih harakteristik obuvi: diss. kand. tehn. nauk.]. Novosibirsk: Novosibirsk Technological Institute (branch) of the Russian State University named after A. N. Kosygin (Technologies. Design. Art) (In Russian).
- Afferrante, L., Carbone, G., Demelio, G. (2012). Interacting and coalescing Hertzian asperities: A new multiasperity contact model, *Wear*, vol. 278–279, pp. 28–33.
- Ciavarella, M., Joe, J., Papangelo, A. and Barber, J.R. (2019). The role of adhesion in contact mechanics, *Journal of the royal society interface*, vol. 16(151): 20180738.
- Cleland, L.D., Rowland, H.M., Mazza, C. and Saal, H.P. (2023). Complexity of spatio-temporal plantar pressure patterns during everyday behaviours, *Journal of the royal society interface*, vol. 20(203): 20230052.
- Kim, I.-J., Smith, R. and Nagata, H. (2001). Microscopic observations of the progressive wear on shoe surfaces that affect the slip resistance characteristics, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 28(1), pp. 17–29.
- Kim, I.-J. (2015). Wear Observation of Shoe Surfaces: Application for Slip and Fall Safety Assessments, *Tribology Transactions*, vol. 58(3), pp. 407–417.
- Kim, I.-J. (2016). Identifying shoe wear mechanisms and associated tribological characteristics: Importance for slip resistance evaluation, *Wear*, vol. 360–361, pp. 77–86.
- Xu, S., De, S., Khaleghian M. and Emami, A. (2025). Wear Resistance of Additively Manufactured Footwear Soles, *Lubricants*, vol. 13(2):13020089.

Информация об авторах

Information about the authors

Радюк Анастасия Николаевна

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническое регулирование и товароведение», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: ana.r13@mail.ru

Борисова Татьяна Михайловна

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и технология одежды и обуви», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: kaversy@mail.ru

Нейфельд Мария Александровна

Аспирант кафедры «Техническое регулирование и товароведение», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: mneufeld8@yandex.by

Буркин Александр Николаевич

Доктор технических наук, профессор кафедры «Техническое регулирование и товароведение», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: a.burkin@tut.by

Anastasia N. Radyuk

Candidate of Sciences (in Engineering), Associate Professor at the Department "Technical Regulation and Commodity Science", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: ana.r13@mail.ru

Tatsiana M. Borisova

Candidate of Sciences (in Engineering), Associate Professor at the Department "Design and Technology of Clothing and Footwear", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: ana.r13@mail.ru

Maria A. Neufeld

Postgraduate Student of the Department "Technical Regulation and Commodity Science", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: mneufeld8@yandex.by

Alexander N. Burkin

Doctor of Science (in Engineering), Professor at the Department "Technical Regulation and Commodity Science", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: a.burkin@tut.by