

**ОЦЕНКА ТРИБОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
СИСТЕМЫ «ОБУВЬ – ОПОРНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ»**

**ASSESSMENT OF TRIBOELECTRICAL PROPERTIES
OF “FOOTWEAR – SUPPORTING SURFACE” SYSTEM**

О.А. БЕЛИЦКАЯ, К.Л. ИГНАТОВА, В.В. КОСТЫЛЕВА, А.А. ФОКИНА, Е.С. РЫКОВА

O.A. BELITSKAYA, K.L. IGNATOVA, V.V. KOSTYLEVA, A.A. FOKINA, E.S. RYKOVA

(Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(The Kosygin State University of Russia)

E-mail: belitskaya-oa@rguk.ru

В статье рассмотрены основные причины возникновения трибоэлектричества при контакте обуви с различными типами опорных поверхностей. Проведена оценка изменения напряженности электростатического поля и постоянной времени релаксации электростатических зарядов системы «обувь – опорная поверхность». Выявлено, что напряженность электростатического поля системы «обувь – опорная поверхность» находится в диапазоне до 4,0 кВ/м при существенном влиянии на нее показателей относительной влажности воздуха. Постоянная времени релаксации колеблется в пределах от 35 до 300 с, при этом наиболее высокое значение показала керамическая плитка и подошвенный материал термоэластопласт. Актуальность исследований основывается на том, что изучение свойств трибоэлектричества в напольных покрытиях и обуви позволит определить вектор совершенствования конструкций антистатической обуви.

The article considers the main causes of triboelectricity occurrence during contact of footwear with different types of supporting surfaces. The change of electrostatic field intensity and electrostatic charge relaxation time constant of the “footwear – supporting surface” system are assessed.

It is revealed that the electrostatic field intensity of the “footwear – supporting surface” system is in the range of up to 4.0 kV/m with a significant influence of relative air humidity. The relaxation time constant fluctuates between 35 and 300 s, with the highest value shown by ceramic tiles and thermoplastic sole material. The relevance of the research is based on the fact that the study of triboelectricity properties in floor coverings and footwear will allow determining the vector of improvement of antistatic footwear designs.

Ключевые слова: трибоэлектрические свойства, материалы верха и низа обуви, напольные покрытия, обувь, электростатические заряды, постоянная времени релаксации, напряженность электростатического поля.

Keywords: triboelectric properties, upper and lower shoe materials, flooring, footwear, electrostatic charges, relaxation time constant, electrostatic field strength.

Введение

Трибоэлектричество – это явление, которое возникает при соприкосновении двух материалов и проявляется в генерации электростатического заряда (ЭСЗ) [1, 2]. Этот эффект широко известен в таких областях, как энергетика, микроэлектроника и биомедицина. Одной из самых распространенных ситуаций, когда трибоэлектричество играет важную роль, является контакт между поверхностью обуви и опорной поверхностью [3, 4].

Накопление заряда на теле человека происходит в том случае, когда тело изолированно и быстро не разряжается [5]. Это проявляется при использовании обуви на подошве из изолирующего материала на изолированной площадке или полу. Изоляция в данном случае может возникнуть в результате применения синтетического материала для пола. Оба указанных фактора взаимосвязаны. Недостаточно иметь подошву обуви из электропроводящего материала, если работник идет по синтетическому покрытию пола, представляющему собой хороший диэлектрик. Необходимо, чтобы и напольное покрытие обладало нужной электропроводимостью. Только в этом случае будет обеспечиваться стекание заряда с тела человека на землю.

Непрерывное заземление человека при передвижении по напольному покрытию и земле обеспечивает система «человек – обувь – напольное покрытие». В данной системе главную роль в накоплении ЭСЗ играют материалы, из которых изготовлена одежда и обувь, а в стекании ЭСЗ – материалы низа обуви и напольного покрытия.

При ходьбе возможна как контактная, так и трибоэлектризация. Прикосновение обуви обуславливает контактную электризацию, а движение человека – трибоэлектризацию по причине трения между обувью и поверхностью опоры.

Степень электризации человека зависит от интенсивности его движений, погодных условий. Релаксация заряда с тела будет во многом определяться скоростью стекания заряда в момент соприкосновения подошвы обуви с поверхностью при движении. Когда

человек интенсивно шагает, то согласно эргономическим данным он делает в секунду два шага. Следовательно, в одну секунду подошва обуви касается опорной поверхности три раза. Продолжительность соприкосновения опорной ноги с поверхностью составляет около 0,3 секунды. За это время заряд должен стечь с тела человека, по крайней мере, на 80...95 %. В противном случае возможно накопление заряда при каждом шаге. При увеличении интенсивности движения, если скорость генерации зарядов будет при этом превышать скорость релаксации зарядов, возможно и дополнительное накопление зарядов при касании подошвы обуви опорной поверхности.

Выделяют две основные группы способов защиты от статического электричества:

- предотвращение накопления зарядов статического электричества путем увеличения проводимости материалов;
- нейтрализация зарядов статического электричества с помощью специальных устройств.

Проблему электростатической защиты можно решить при использовании специальных напольных покрытий из натуральных волокон или специальных проводящих материалов в виде ковров, матов, паласов, которые служат не только для покрытия полов, но и для защиты рабочих поверхностей [6, 7]. Имеются специальные виды линолеумов для борьбы со статическим напряжением.

Особую опасность представляет электризация горючего в нефтегазоперерабатывающей отрасли. Наэлектризованные частицы горючего передают свои заряды поверхностям цистерны или резервуара, и если последние не заземлены, то может накопиться статическое электричество напряжением в несколько тысяч вольт. Напряжение в 300...500 В уже может вызвать искру, сопровождающуюся таким повышением температуры, которое способно воспалить смесь паров топлива с воздухом [8, 9]. Электризуемость горючего характеризует его способность накапливать электрические заряды. Разряд электростатических потенциалов через паровоздуш-

ную среду может явиться одним из источников зажигания горючих смесей. В этом отношении электризуемость рассматривается как характеристика пожаро-, взрывоопасности горючего.

Множество пожаров и взрывов от статического электричества происходит на промышленных объектах по производству пластмасс, красителей, синтетических смол, химических порошков, медикаментов [10]. В научных работах турецких ученых сообщается о пожарах при морских перевозках грузов на танкерах, где одной из возможных причин называется использование синтетических материалов и нестандартной одежды [11].

Кафедра художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи занимается системным изучением электростатических свойств обувных материалов и обуви в целом [12, 13].

Задача настоящего исследования состоит в оценке трибоэлектрических свойств плоских материалов, которые применяются для подошв обуви, а также обувных конструкций.

Методы исследования

Первая часть испытаний проводилась на динамической установке, основой которой является измеритель напряженности электростатического поля (ЭСП) СТ-01 [14]. Методика проведения экспериментов заключалась в фиксации напряженности электростатического поля при возвратно-поступательном движении образца подошвенного материала размером 2×20 см по различным опорным поверхностям в помещении при

температуре 22±20 °С и относительной влажности воздуха 60±5%.

Вторая часть испытаний – измерения времени релаксации ЭСЗ с помощью автоматизированной экспресс-методики [14]. Образование заряда на испытуемом образце осуществлялось его натиранием любым материалом (кожа, картон, пластик, шерсть и др.) либо биполярным ионизатором воздуха, способным образовывать на материале как положительные, так и отрицательные заряды.

Из широкого ассортимента материалов для низа обуви для первой и второй частей испытаний выбраны 7 подошвенных материалов и 7 опорных поверхностей, список которых представлен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Материалы низа обуви	Названия опорных поверхностей
Кожа подошвенная	Ковролин (100 % полипропилен)
Кожволон	Линолеум № 1 (100% ПВХ)
Резина монолитная	Линолеум № 2 (ПВХ на войлочной основе)
Резина микропористая	Керамическая плитка
Дивинилстирольный термоэластопласт (ТЭП)	Дерево
Термополиуретан (ТПУ)	Пробковое покрытие
Пластикат поливинилхлорида (ПВХ)	Асфальт

Третья часть – серия испытаний с использованием индивидуального регистратора-индикатора ИРИ-04М [15] для установления величины напряженности ЭСП при движении человека по различным напольным покрытиям (табл. 2) в обуви (4 модели) и одежде преимущественно из хлопка при влажности более и менее 40%.

Т а б л и ц а 2

Конструкции обуви	Названия опорных поверхностей
Модель № 1 – кроссовки литьевого метода крепления, материал подошвы – ЭВА	Ковролин (100 % полипропилен)
Модель № 2 – полуботинки клеевого метода крепления, материал подошвы – монолитная резина	Ламинат
Модель № 3 – туфли лодочки без каблука клеевого метода крепления, материал подошвы – ТПУ	Линолеум (100% ПВХ)
Модель № 4 – туфли лодочки на каблуке (50 мм) клеевого метода крепления, материал подошвы – микропористая резина, материал набойки – пластмасса	Керамическая плитка
	Бетон
	Дерево
	Резиновая крошка
	Асфальт

Результаты и обсуждение

Результаты первой части исследований трибоэлектрических свойств материалов

низа обуви при контакте с различными опорными поверхностями представлены на рис. 1.

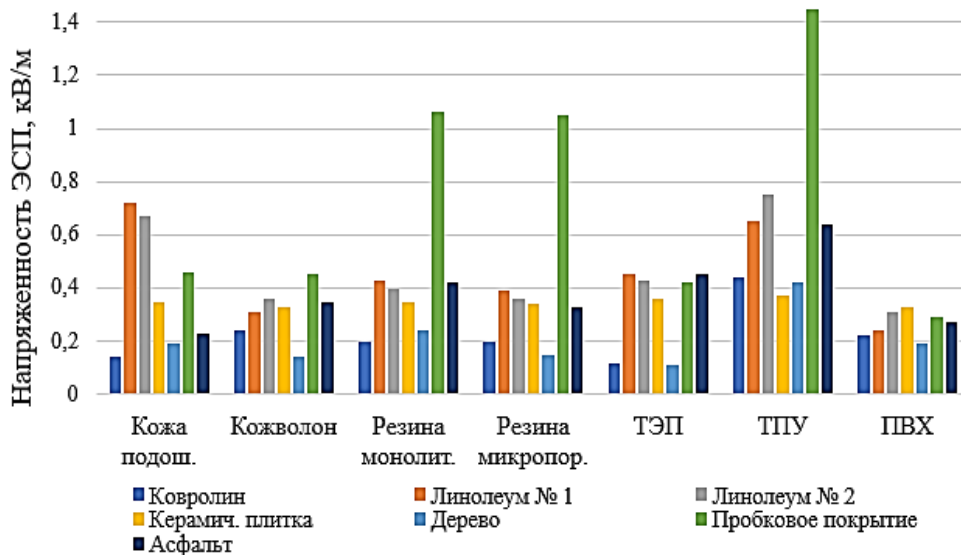


Рис. 1

Значения напряженности ЭСП находятся в пределах от 0,1 до 1,45 кВ/м. Минимальные значения зафиксированы на деревянном покрытии практически для всех материалов низа обуви. Пробковое напольное покрытие показало наиболее высокие значения трибоэлектрических свойств, особенно при соприкосновении подошвы из ТПУ.

Вторая часть исследования (рис. 2, 3) показала, что для материалов напольных покрытий постоянная времени релаксации различна и зависит от их удельного электрического сопротивления.

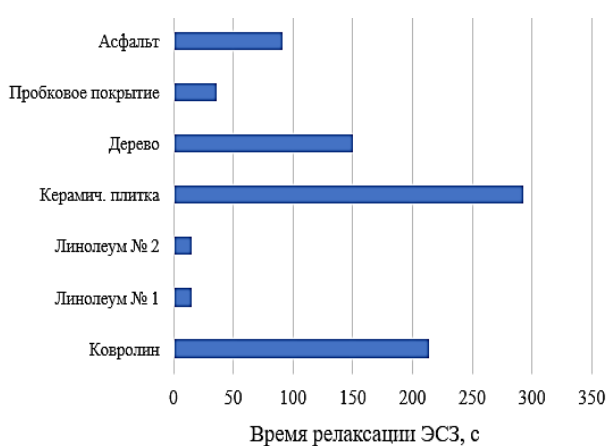


Рис. 2

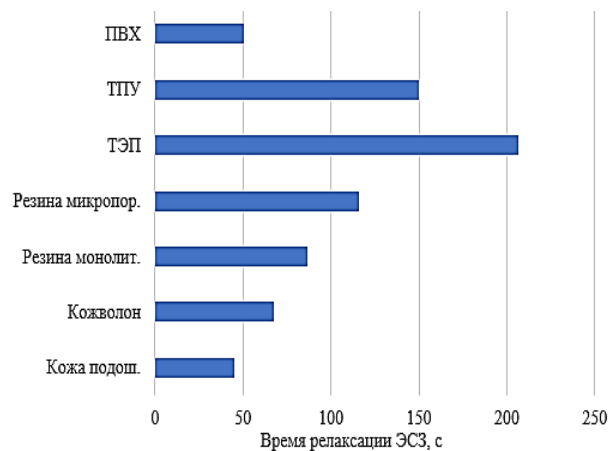


Рис. 3

Постоянная времени релаксации колеблется в пределах от 35 до 300 с. Наиболее высокое значение показала керамическая плитка – время релаксации достигает 300 с, минимальное время релаксации заряда у линолеумов – не более 20 с. Постоянная времени релаксации материалов для низа обуви колеблется в пределах от 47 до 200 с: наибольший показатель зафиксирован у

термоэластопласта, а наименьший – у натуральной подошвенной кожи.

Результаты третьей части исследований (рис. 4) показывают, что при влажности более 40% напряженность ЭСП на таких напольных покрытиях, как ковролин, ламинат, плитка, бетон, дерево, резиновая крошка, приблизительно одинакова.

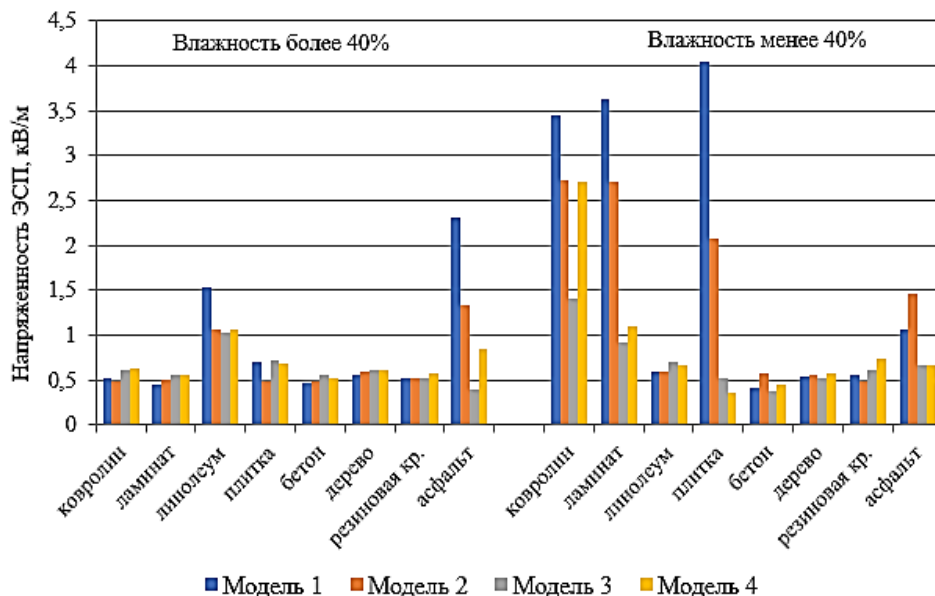


Рис. 4

На линолеуме и асфальте напряженность ЭСП выше, чем на остальных покрытиях. При влажности менее 40% напряженность ЭСП на таких напольных покрытиях, как ковровлин, ламинат и плитка, значительно выше, чем на остальных.

Анализ результатов всех измерений показал прямую зависимость напряженности ЭСП от влажности воздуха. Так, при влажности более 40% значения напряженности при движении во всех моделях обуви по всем напольным покрытиям ниже, чем при влажности менее 40%. Максимальные значения напряженности ЭСП показала модель обуви № 1 при движении по ковровлину, ламинату и плитке (влажность менее 40%), она же продемонстрировала максимальные значения напряженности ЭСП при движении по линолеуму и асфальту (влажность более 40%).

ВЫВОДЫ

Исследования показали, что в системе «обувь – опорная поверхность» напряженность ЭСП материалов низа обуви и обувных конструкций находится в диапазоне от 0,11 до 4,00 кВ/м, при этом существенное влияние на величину напряженности ЭСП оказывает влажность: при высокой относительной влажности воздуха молекулы воды,

оседая на поверхности материалов, рассеивают накопленные ЭСЗ, что приводит к повышению общей электропроводности.

Релаксация заряда (стекание заряда) – процесс снижения энергии и поверхностной плотности заряда, продолжительность которого находится в диапазоне от 20 до 300 с у опорных поверхностей; от 50 до 200 с – у материалов для низа обуви. Стеkanie заряда с материалов ограничивает электростатические эффекты. Следовательно, скорость релаксации заряда напрямую определяет уровень проводимости материалов и является важным параметром.

Очевидно, что напряженность ЭСП и время релаксации ЭСЗ системы «обувь – опорная поверхность» являются определяющими, но не единственными факторами для понимания трибоэлектрических свойств системы. Результаты измерений могут составить основу для разработки способов исключения/снижения накопления зарядов статического электричества, а также для прогнозирования процессов стекания заряда с тела человека на опорную поверхность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Утелбаев Б.Т., Сулейменов Э.Н., Утелбаева А.Б., Шарипов Р.Х. Трибоэлектризация и "электромагнитная материя" // Наука и мир. 2020. № 9-1(85). С. 17...23.

2. Pan S., Zhang Z. Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A Review // Friction 2019, 07(01). P. 2...17.

3. Swenson D.E. Footwear and flooring: charge generation in combination with a person as influenced by environmental moisture, Electrostatics, Journal of Physics Conference Series, 2015, 646. – doi:10.1088/1742-6596/646/1/012061.

4. Smallwood J., Swenson D.E. Evaluation of performance of footwear and flooring systems in combination with personnel using voltage probability analysis // 13th International Conference on Electrostatics, Journal of Physics, 2011, 301. – DOI 10.1088/1742-6596/301/1/012064.

5. Chowdhury F., Ray M., Passalacqua A. et al. Evaluating the electrostatic charge transfer model for particle-particle interactions // Journal of Electrostatics, 112, July 2021, 103603.

6. Павлов А.В., Оттова П.О., Федякова Н.В., Зеленская А.Д. Антистатическое эпоксидное покрытие для пола. Ч. 1 // Лакокрасочные материалы и их применение. 2019. № 7-8. С. 40...43.

7. Павлов А.В., Оттова П.О., Федякова Н.В., Зеленская А.Д. Антистатическое эпоксидное покрытие для пола. Ч. 2 // Лакокрасочные материалы и их применение. 2019. № 11. С. 20...23.

8. Egan S. Learning lessons from five electrostatic incidents // Special Issue on The International Conference on Electrostatics, 2017, Edited by Klaus Schwenzfeuer, 88, (August 2017), P. 183...189.

9. Hu Yu., Wang D., Liu J., Gao J. A case study of electrostatic accidents in the process of oil-gas storage and transportation // Journal of Physics: Conference Series. 2013. P. 418.

10. Марков А.Г., Харламенков А.С. Проблемы учета состояния систем молниезащиты и защиты от статического электричества при оценке величин пожарного риска на производственных объектах // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 11. С. 81...86.

11. Elidolu G. et al. Quantitative failure analysis for static electricity-related explosion and fire accidents on tanker vessels under fuzzy bow-tie CREAM approach // Engineering Failure Analysis. 2022. С. 131.

12. Belitskaya O.A., Fokina A.A., Belgorodskiy V.S. et al. Integral Assessment of Antistatic Properties of Materials Used in Individual Safety Gear // Materials Science Forum, 2023, № 1085, P. 101...106.

13. Белицкая О.А., Фокина А.А., Рыкова Е.С. и др. Влияние климатических параметров на трибоэлектрические свойства материалов специальной обуви // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 5(395). С. 48...53. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_5_48.

14. Белицкая О.А., Леденева И.Н. Основы моделирования трибоэлектрических свойств материалов для обуви: монография. М.: МГУДТ, 2014. 91 с. – ISBN 978-5-87055-207-1.

15. Белицкая О.А., Сироткина О.В. Разработка методики оценки безопасности специальной обуви

под влиянием внешних факторов // Дизайн и технологии. 2019. № 74(116). С. 30...38.

REFERENCES

1. Utelbaev B.T., Suleimenov E.N., Utelbaeva A.B., Sharipov R.Kh. Triboelectrification and “electromagnetic matter” // Science and World. 2020. No. 9-1 (85). P. 17...23.

2. Pan S., Zhang Z. Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A Review // Friction 2019, 07(01), P. 2...17.

3. Swenson D.E. Footwear and flooring: charge generation in combination with a person as influenced by environmental moisture, Electrostatics, Journal of Physics Conference Series, 2015, 646. – doi:10.1088/1742-6596/646/1/012061

4. Smallwood J., Swenson D.E. Evaluation of performance of footwear and flooring systems in combination with personnel using voltage probability analysis, 13th International Conference on Electrostatics, Journal of Physics, 2011, 301. – DOI 10.1088/1742-6596/301/1/012064.

5. Chowdhury F., Ray M., Passalacqua A., Mehrani P., Sowinski A. Evaluating the electrostatic charge transfer model for particle-particle interactions // Journal of Electrostatics, 112, July 2021, 103603.

6. Pavlov A.V., Ottova P.O., Fedyakova N.V., Zelen-skaya A.D. Antistatic epoxy floor coating. Part 1 // Paints and varnishes and their application. 2019. No. 7-8. P. 40...43.

7. Pavlov A.V., Ottova P.O., Fedyakova N.V., Zelen-skaya A.D. Antistatic epoxy floor coating. Part 2 // Paints and varnishes and their application. 2019. No. 11. P. 20...23.

8. Egan S. Learning lessons from five electrostatic incidents // Special Issue on The International Conference on Electrostatics, 2017, Edited by Klaus Schwenzfeuer, 88, (August 2017). P. 183...189.

9. Hu Yu., Wang D., Liu J., Gao J. A case study of electrostatic accidents in the process of oil-gas storage and transportation // Journal of Physics: Conference Series. 2013. P. 418.

10. Markov A.G., Kharlamenkov A.S. Problems of accounting for the state of lightning protection systems and protection from static electricity when assessing fire risk values at production facilities // Labor safety in industry. 2021. No. 11. P. 81...86.

11. Elidolu G. et al. Quantitative failure analysis for static electricity-related explosion and fire accidents on tanker vessels under fuzzy bow-tie CREAM approach // Engineering Failure Analysis. 2022. P. 131.

12. Belitskaya O.A., Fokina A.A., Belgorodskiy V.S., et al. Integral Assessment of Antistatic Properties of Materials Used in Individual Safety Gear, Materials Science Forum, 2023, No. 1085, P. 101...106.

13. Belitskaya O.A., Fokina A.A., Rykova E.S. et al. Influence of climate parameters on triboelectric properties of special footwear materials // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2021. No. 5 (395). P. 48...53.

14. *Belitskaya O.A., Ledeneva I.N.* Fundamentals of modeling triboelectric properties of materials for footwear: monograph. M.: MSUDT, 2014. 91 p.

15. *Belitskaya O.A., Sirotkina O.V.* Development of a methodology for assessing the safety of special foot-

wear under the influence of external factors // Design and technology. 2019. No. 74 (116). P. 30...38.

Рекомендована кафедрой технологии кожи и меха РГУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 23.05.24.
