

Моделирование электростатических полей вокруг человека в обуви и одежде с различной диэлектрической проницаемостью

О.А. Белицкая

*Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство), Российская Федерация*

Аннотация. Объектом исследования является процесс моделирования электростатического поля вокруг человека в обуви и одежде с различной диэлектрической проницаемостью.

Предметом исследования является оценка степени неоднородности величин напряженности электростатического поля, образующийся вокруг человека с учетом трибоэлектрических свойств одежды и обуви.

Цель работы – разработка моделей, которые отражают корреляцию между электростатическим полем и потенциалом тела человека в системе «человек – специальная обувь – напольное покрытие».

Выполнено конечно-элементное моделирование в COMSOL Multiphysics, с помощью которого возможно анализировать как отдельные, так и взаимосвязанные физические процессы, рассматривать влияние формы заряженных твердых тел на неоднородность электростатического поля на их поверхности.

Рассмотрены три вида моделей: человек в обуви и без одежды; человек в обуви и в легкой одежде из материала с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,4$ и усредненной толщиной слоя 0,5 см; человек в обуви, в легкой и теплой одежде из материалов с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4,3$ и усредненной толщиной слоя 2,0–2,5 см. Для определения величин напряженности электростатического поля системы проведен расчет методом конечных элементов.

Выявлено, что электростатическое поле системы «человек – обувь – напольное покрытие» максимально концентрируется в нижней части геометрии тела, т. е. в районе обуви. Для модели в легкой одежде напряженность электростатического поля при одинаковом потенциале на теле человека увеличивается более чем в 2,6 раза, по сравнению с моделью без одежды. Представленный метод моделирования позволяет учитывать свойства материалов, толщины и диэлектрические свойства пакетов одежды и обуви, что позволит оценить потенциальные риски воздействия электростатических полей на здоровье персонала и промышленное оборудование.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при планировании экспериментальных исследований, подборе материалов и проектировании пакетов специальной антистатической обуви и одежды.

Ключевые слова: электростатические разряды, электростатическое поле, моделирование, метод конечных элементов, обувь, одежда, диэлектрическая проницаемость.

Информация о статье: поступила 09 июня 2023 года.

Статья подготовлена по материалам доклада Международной научно-технической конференции «Инновации в текстиле, одежде, обуви (ICTAI–2023)».

Modeling of electrostatic fields around a person wearing shoes and clothes with different dielectric constants

Olga A. Belitskaya

*Russian State University named after A.N. Kosygin (Technology. Design. Art),
Russian Federation*

Abstract. The focus of the study is the process of modeling the electrostatic field surrounding a person wearing shoes and clothes with different dielectric constants.

The objective is to assess the degree of heterogeneity of the electrostatic field strength values generated around a person, considering the triboelectric properties of clothing and shoes.

The purpose of the work is to develop models that illustrate the correlation between the electrostatic field and the potential of the human body in the "person – special shoes – floor covering" system.

Finite element modeling was performed using COMSOL Multiphysics, which enables the analysis of both individual and interconnected physical processes. It also allows for the consideration of the influence of the shape of charged solids on the inhomogeneity of the electrostatic field on their surface.

Three types of models were considered: a person in shoes and without clothes; a person in shoes and light clothing made of a material with a relative dielectric constant $\varepsilon = 24$ and an average layer thickness of 0.5 cm; a person in shoes, in light and warm clothes made of materials with a relative dielectric constant $\varepsilon = 4.3$ and an average layer thickness of 2.0–2.5 cm. The strength of the electrostatic field of the system was calculated applying the finite element method.

The study revealed that the electrostatic field of the "person-shoes-floor covering" system is maximally concentrated in the lower part of the body geometry, i. e. in the shoe area. For a model in light clothing, the electrostatic field strength at the same potential on the human body increases by more than 2.6 times compared to the model without clothing. The presented modeling method allows us to take into account the properties of materials, thickness and dielectric properties of clothing and footwear packages. This will enable the assessment of potential risks of exposure to electrostatic fields on the health of personnel and industrial equipment.

The results of the research can be used in planning experimental studies, selecting materials and designing packages of special antistatic shoes and clothing.

Keywords: electrostatic discharges, electrostatic field, modeling, finite element method, footwear, clothing, dielectric continuity.

Article info: received June 9, 2023.

The article was prepared based on the report of the International Scientific and Technical Conference "International Conference on Textile and Apparel Innovation ICTAI–2023".

В современных производственных условиях антистатическая обувь занимает определенную нишу в номенклатуре специальной обуви, технология производства и качество которой постоянно совершенствуется. Технологические процессы в ряде отраслей промышленности неизбежно сопряжены с образованием электростатического поля (ЭСП) [Кечиев и Пожидаев, 2005]. Антистатическая обувь – это средство индивидуальной защиты от электростатических разрядов, которое не только не позволяет накапливаться электрическим зарядам на теле персонала, но и предохраняет персонал от воздействия электрического напряжения промышленной частоты. Использование антистатической обуви на производстве защищает дорогостоящее оборудование и материалы, обеспечивает безопасность жизни и здоровья людей. Заряд, накопившийся на теле человека в течение производственного процесса, может привести к выходу из строя чувствительных элементов оборудования, либо привести к взрыву или воспламенению [Swenson, 2015; Smallwood and Swenson, 2011]. Несмотря на повышенное внимание к проблеме, электростатический заряд по-

прежнему оказывает большое влияние на стоимость и качество продукции компаний.

Европейские промышленные эксперты оценивают ежегодную потерю денежных средств из-за статического электричества до 8 млрд долларов, а доля потерь изделий оценивается до 30 % от общего объема выпуска. В 27 % случаев причиной взрывов паровоздушных смесей на нефтегазоперерабатывающих предприятиях является статическое электричество.

Исследованию физических характеристик ЭСП посвящены многие работы [Belitskaya, et al., 2023; Белицкая и др., 2021; Белицкая и Костылева, 2022], но отсутствие в настоящее время физических моделей, позволяющих надежно прогнозировать показатели антистатических свойств обуви, характер поведения и стекания электростатических зарядов с тела человека, взаимодействие систем «человек – специальная обувь – напольное покрытие» делает актуальными дальнейшие разработки в данной области.

Моделирование ЭСП может быть полезным во многих областях, таких как электроника, электроэнергетика,

медицина, нефтегазоперерабатывающий комплекс и т. д. Например, в электронике моделирование ЭСП способствует проектированию и оптимизации электронных устройств, таких как микрочипы, транзисторы и диоды (Guo, Guo and Yu, 2014; Li, Yao, Zhao and Wang, 2020; Морозов, 2002). В медицине моделирование ЭСП может быть использовано для изучения воздействия электрических полей на ткани и органы человека, что может помочь в разработке новых методов лечения. Моделирование ЭСП в нефтегазоперерабатывающей отрасли возможно использовать для определения воздействия электростатических разрядов, с целью выявления оптимального расположения заземляющих элементов для снижения до безопасных величин напряженности ЭСП (Rahou, Tilmatine, Bilici and Dascalescu, 2013; Chowdhury et al., 2021). Кроме того, моделирование может использоваться для изучения влияния электростатических разрядов на окружающую среду, что содействует разработке мер по предотвращению негативных последствий.

Одним из методов моделирования является метод конечных элементов (МКЭ), который применяется для решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Он используется для моделирования различных конструкций, устройств и процессов во всех областях инженерных, производственных и научных исследований. МКЭ позволяет рассматривать цельную конструкцию как множество отдельных конечных элементов и проводить исследования технических характеристик проектируемых объектов без необходимости создания экспериментальных образцов и дорогостоящих натуральных исследований.

Для моделирования МКЭ возможно использовать ПО COMSOL Multiphysics, которое применяется для решения сложных прикладных задач, включающих в себя несколько физических явлений, таких как механика, теплообмен, акустика, электромагнетизм (в том числе и расчет электрических полей) и др. Предварительное моделирование процессов, связанных с накоплением статического электричества на человеке, позволяет эффективнее планировать экспериментальные исследования, сокращает их объем и позволяет быстрее, эффективнее и точнее решать практические задачи, связанные с электростатической безопасностью.

Цель работы – разработка моделей, которые отражают корреляцию между ЭСП и потенциалом тела человека в системе «человек – специальная обувь – напольное

покрытие».

Для решения этой задачи использовался программный комплекс COMSOL Multiphysics с модулем «Электростатика», ориентированный на проведение электростатических расчетов.

Основными параметрами, характеризующими ЭСП зарядов, являются напряженность ЭСП и потенциалы его отдельных точек.

В модуле «Электростатика» напряженность ЭСП определяется через электрический потенциал, соотношением:

$$E = -\nabla V, \quad (1)$$

где E – напряженность электростатического поля, кВ/м; V – электрический потенциал, В; ∇ – оператор «набла».

Для расчетов ЭСП в присутствии диэлектриков вводится электрическая индукция:

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon \times E, \quad (2)$$

где ε_0 – электрическая постоянная, равна $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ε – относительная диэлектрическая проницаемость; D – электрическая индукция, Кл/м².

Для вычислений используется закон Гаусса в виде следующего уравнения:

$$\nabla D = \rho, \quad (3)$$

где ρ – плотность пространственного заряда, Кл/м³.

Уравнение (3) в общем виде описывает распределение ЭСП в пространстве.

Для плоскостного 2D-моделирования интерфейс COMSOL Multiphysics предполагает симметрию, при которой электрический потенциал изменяется только в направлениях x и y и постоянен в направлении z . Это означает, что электрическое поле E касается плоскости xy . При такой симметрии решается то же уравнение, что и в трехмерном случае.

Модуль «Электростатика» позволяет создавать модели электростатических систем с различными одномерными комбинациями, двумерных оболочек и трехмерных тел. Это возможно благодаря технологии на основе метода граничных элементов. Для моделей на основе МКЭ визуализировать рассчитанные поля можно с помощью графиков сечений, контурных графиков, графиков изоповерхностей, силовых линий, стрелочных диаграмм и т. д. Для обработки результатов при этом ис-

пользуется объёмная конечно-элементная сетка. Одно из ограничений заключается в том, что у всех моделей должны быть постоянные и изотропные свойства материала. Для электростатических расчетов, во всех рассматриваемых моделях относительная диэлектрическая проницаемость должна быть постоянной. При этом можно создавать модели, содержащие несколько областей с различной диэлектрической проницаемостью.

Рассмотрены три вида моделей:

Модель № 1 – человек без одежды;

Модель № 2 – человек в легкой одежде, материал с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2,4$ и усредненной толщиной слоя = 0,5 см;

Модель № 3 – человек в легкой и теплой одежде, материал с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 4,3$ и усредненной толщиной слоя = 2,0–2,5 см.

Дополнительно выбраны следующие параметры: в помещении с размерами 5х5х3 м³ находится человек ростом 170 см (вертикальная ось – 170 см, горизонтальная ось – 60–70 см; руки опущены вдоль тела), пол помещения заземлен, а тело человека является проводником, обувь с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 3,5$, потенциал на человеке варьируется от 0,1 до 30 кВ.

Типичные результаты моделирования (модель № 2) представлены на рисунке 1. Идентификация конкретных значений ЭСП соответствует цветовой шкале. По-

казано, что рост потенциала на теле человека приводит к увеличению значений напряженности ЭСП, которое происходит не равномерно, а возникающие локальные неоднородности обусловлены геометрией системы «человек – специальная обувь – напольное покрытие». При достижении электрического потенциала в 30 кВ в нижней части тела и в области ног величины напряженности ЭСП могут достигать значений 1400–1800 кВ/м (рисунок 2).

Характерные кривые, отражающие зависимости максимальных и усредненных значений напряженности ЭСП на поверхности тела, растут пропорционально увеличению потенциала (рисунок 3). Средние значения достигают 18,2 кВ/м, а максимальные значения соответствуют 2200 кВ/м и превышают средние более чем в 100 раз при потенциале 30 кВ.

Объемное распределение напряженности ЭСП при потенциале на теле 30 кВ представленное на рисунке 4, зависит от многих факторов, таких как форма и размеры тела человека, электрические свойства тканей и окружающей среды, а также наличие и характеристики источников электростатического заряда. Силовые линии ЭСП всегда незамкнуты: начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных зарядах. При этом, как и силовые линии других векторных полей, они не пересекаются и не касаются друг друга, а густота их тем больше, чем больше напряженность ЭСП

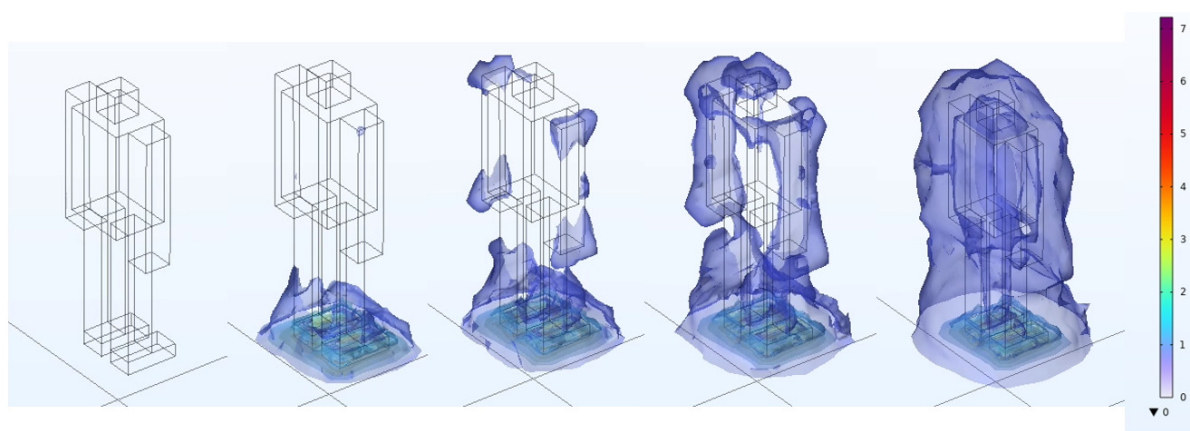


Рисунок 1 – Нарастание напряженности электростатического поля (кВ/м) при увеличении потенциала (кВ) на теле человека

Figure 1 – Increase in electrostatic field strength (kV/m) with human body potential (kV) raise

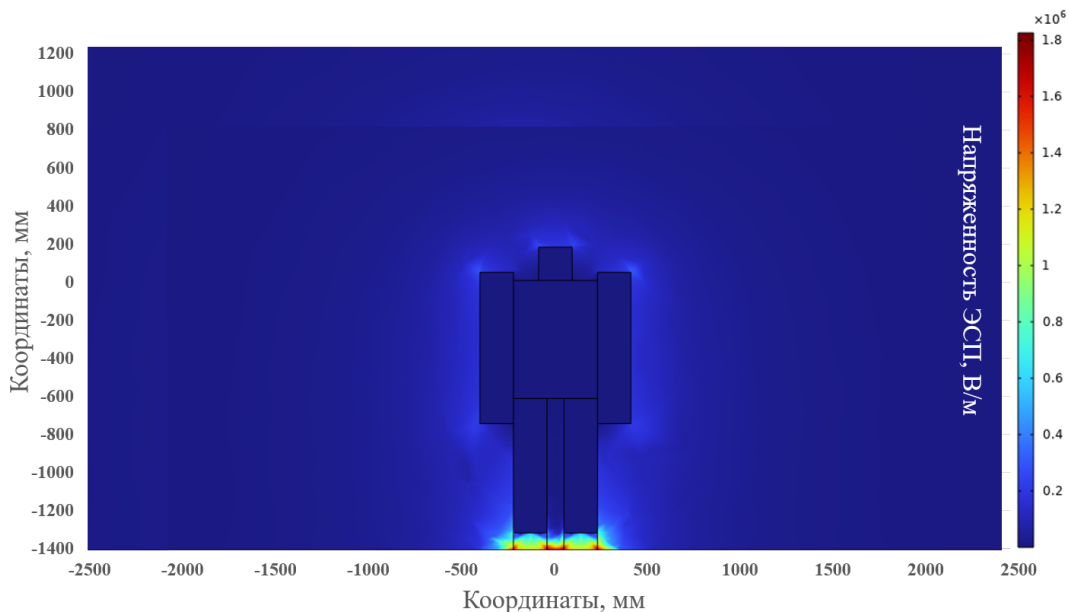


Рисунок 2 – Зависимость напряженности ЭСП от потенциала на человеке (фронтальное сечение)
Figure 2 – Dependence of the electrostatic field strength on a person potential (frontal section)

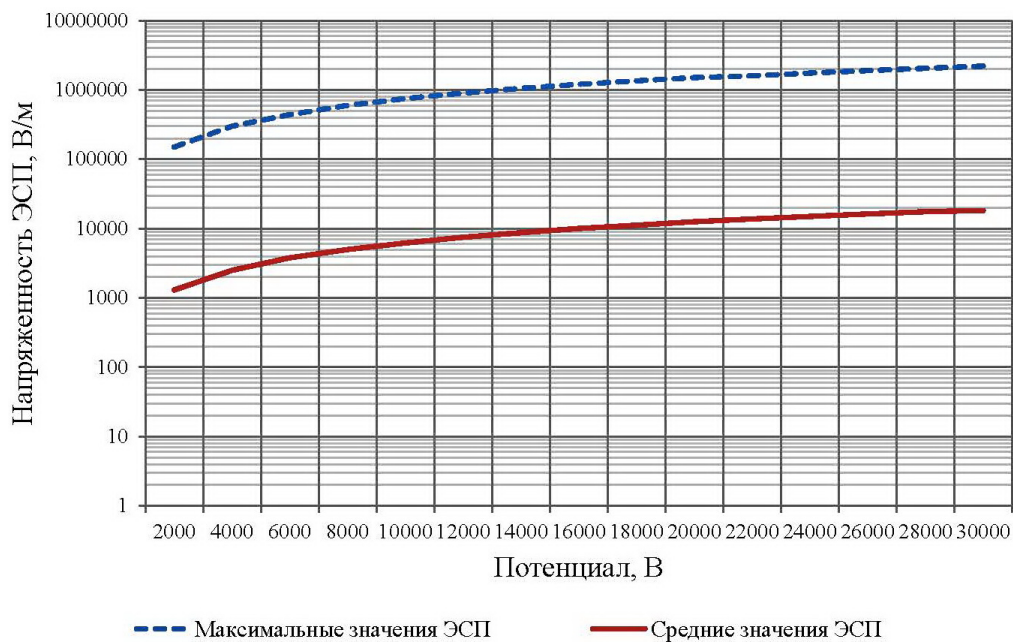


Рисунок 3 – Зависимости максимальных и средних значений напряжённости ЭСП на поверхности тела от потенциала
Figure 3 – Dependence of the maximum and average values of the electrostatic field strength on the body surface on the potential

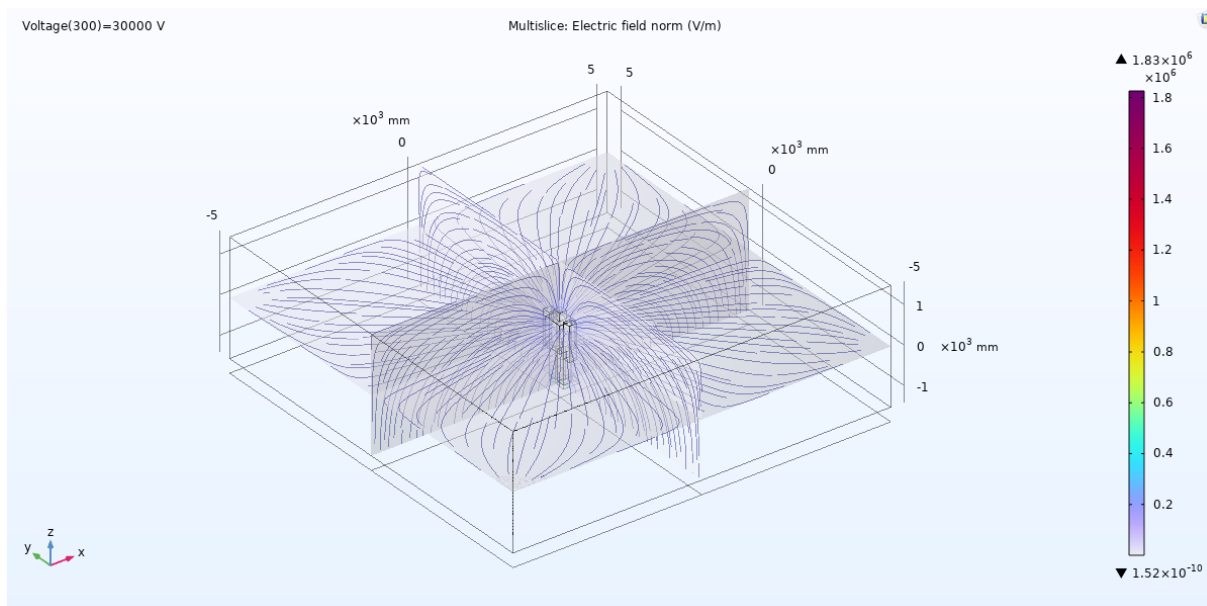


Рисунок 4 – Объемное распределение напряжённости ЭСП при потенциале на теле 30 кВ
Figure 4 – Volumetric distribution of electrostatic field strength at a body potential of 30 kV

в данном месте.

Таким образом, при моделировании параметров Модели № 2 выявлено, что ЭСП системы «человек – специальная обувь – напольное покрытие» максимально концентрируется в нижней части геометрии тела, т. е. в районе обуви. При этом напряженность ЭСП при потенциале на теле человека 30 кВ может достигать 1800 кВ/м.

При вычислениях с использованием параметров Модели № 1 получены следующие результаты – ЭСП системы «человек – специальная обувь – напольное покрытие» максимально концентрируется также в нижней части геометрии тела, т. е. в районе обуви. При потенциале 30 кВ напряженность ЭСП составляет до 700 кВ/м. В Модели № 2 напряженность ЭСП на теле человека увеличивается более чем в 2,6 раза по сравнению с Моделью № 1, что говорит о несомненном влиянии одежды на величину электростатического заряда.

Результаты, полученные при использовании параметров Модели № 3 показали, что ЭСП также максимально концентрируется в районе обуви и при потенциале 30 кВ напряженность ЭСП составляет 1500 кВ/м. Соот-

ветственно, относительно Модели № 2 напряженность ЭСП на теле человека при потенциале 30 кВ практически не изменилась, что говорит о незначительном влиянии толщины слоя одежды на теле человека на величину электростатического заряда и, следовательно, ЭСП.

Проведено моделирование ЭСП для случая, когда человек находился в том же заданном пространстве, но в другой позиции – с вытянутой рукой. На рисунке 5 показана «красная» зона в области ладони, которая соответствует максимальным значениям ЭСП. Полученные данные полностью согласуются с теорией и практикой, когда значения напряженности ЭСП заряженного предмета резко возрастают в области максимальной кривизны поверхности («эффект острия»).

Таким образом, с помощью методов математического моделирования в ПО COMSOL Multiphysics, проведен анализ взаимосвязи накопления электростатических зарядов на теле человека от электрического потенциала, наличия обуви и одежды с различной диэлектрической проницаемостью в системе «человек – специальная обувь – напольное покрытие». Выявлены следующие особенности:

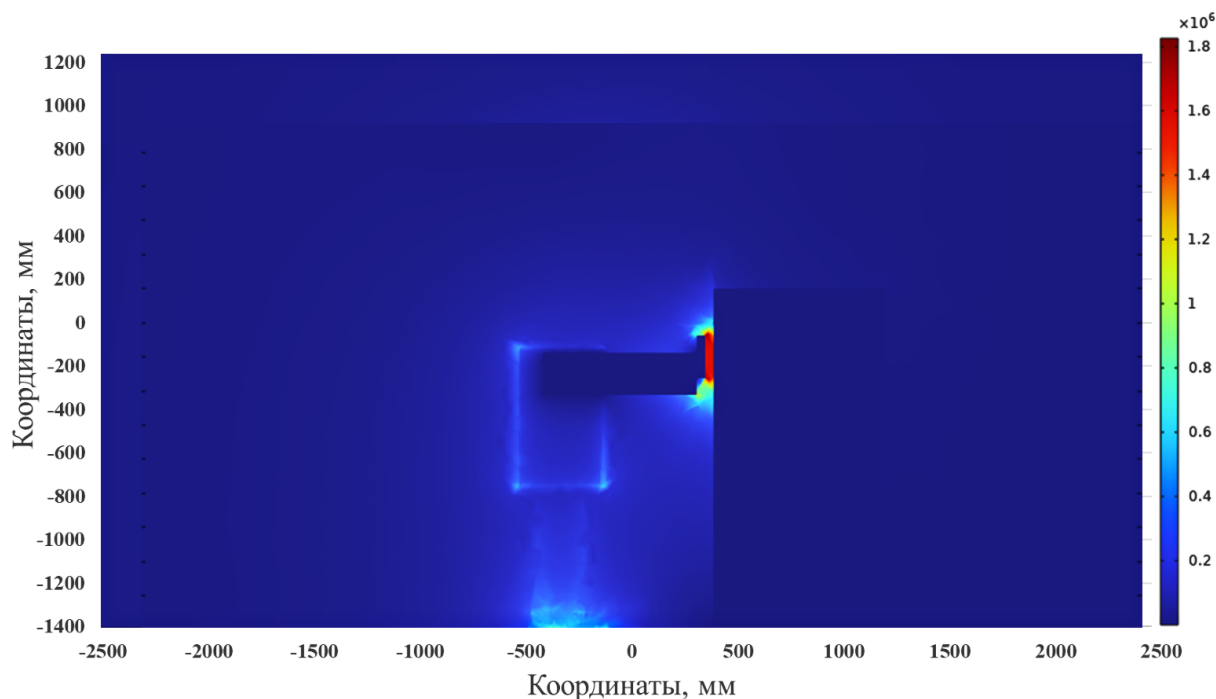


Рисунок 5 – Зависимость напряженности ЭСП от потенциала на человеке в сечении, человек в позиции с вытянутой рукой

Figure 5 – Dependence of the electrostatic field strength on the potential on the person in cross-section (a person in the position with an outstretched arm)

– величины напряженности ЭСП на поверхности тела (одежды) пропорциональны электрическому потенциалу человека;

– в реальных условиях ЭСП крайне неоднородно и значения напряженности на поверхности различных частей тела могут различаться на два порядка;

– представленный метод моделирования позволяет учитывать диэлектрические параметры материалов, варьировать толщину пакетов одежды и обуви.

Метод моделирования ЭСП с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics с модулем

«Электростатика» может быть полезным при планировании экспериментальных исследований величин напряженности электростатического поля, образующийся вокруг человека, для оценки рисков возникновения электростатических зарядов, при разработке мер для снижения электростатической опасности на предприятиях при производстве и хранении легковоспламеняющихся материалов, электроники и пр., где статическое электричество, накопленное на персонале, может создать опасные ситуации и повлиять на качество и производительность процессов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Белицкая, О.А. Фокина, А.А. Рыкова, Е.С. Максимова, И.А. Конарева, Ю.С. (2021). Влияние климатических параметров на трибоэлектрические свойства материалов специальной обуви, *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, № 5 (395), С. 48–53.

Белицкая, О.А., Костылева, В.В. (2022). Установление корреляционных зависимостей антистатических показателей материалов для производства обуви специального назначения, *Промышленные процессы и технологии*, № 3 (5), С. 47–56.

Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д. (2005). *Защита электронных средств от воздействия статического электричества*, Москва, Издательский Дом «Технологии», Российская Федерация.

Морозов, В.А. (2002). Моделирование электростатических полей с применением банков математических моделей и численных методов, *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*, № 3. С. 3–5.

Belitskaya, O.A, Fokina, A.A., Belgorodskiy, V.S., Sokolovskiy, A.R., Panferova, E.G. (2023). Integral Assessment of Antistatic Properties of Materials Used in Individual Safety Gear, *Materials Science Forum*, № 1085, pp. 101–106.

Chowdhury, F, Ray, M., Passalacqua, A., Mehrani, P., Sowinski, A. (2021). Evaluating the electrostatic charge transfer model for particle-particle interactions, *Journal of Electrostatics*, № 112, pp. 5–9.

Guo, B.Y., Guo, J., Yu, A.B. (2014). Simulation of the electric field in wire-plate type electrostatic precipitators, *Journal of Electrostatics*, Issue 4, pp. 301–310.

Li, J., Yao, J., Zhao, Y., Wang, C-H (2020). Large eddy simulation of electrostatic effect on particle transport in particle-laden turbulent pipe flows, *Journal of Electrostatics*, Volume 109, pp. 199–207.

Rahou, F, Tilmatine, A., Bilici, M., Dascalescu, L. (2013). Numerical simulation of the continuous operation of a tribo-aero-electrostatic separator for mixed granular solids, *Journal of Electrostatics*, Issue 5, pp. 867–874.

Smallwood, J., Swenson, D.E. (2011). Evaluation of performance of footwear and flooring systems in combination with personnel using voltage probability analysis, *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 301, pp. 145–152.

Swenson, D.E. (2015). Footwear and flooring: charge generation in combination with a person as influenced by environmental moisture, *Journal of Physics Conference Series*, Volume 646, pp. 273–281.

REFERENCES

Belitskaya, O.A. Fokina, A.A. Rykova, E.S. Maksimova, I.A. Konareva, Yu.S. (2021). The influence of climatic parameters on the triboelectric properties of special footwear materials [Vliyaniye klimaticheskikh parametrov na triboelektricheskiye svoystva materialov spetsial'noy obuvi], *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, № 5 (395), pp. 48–53 (in Russian).

Belitskaya, O.A., Kostyleva, V.V. (2022). Establishment of correlation dependencies of antistatic indicators of materials for the production of special-purpose footwear [Ustanovleniye korrelyatsionnykh zavisimostey antistaticheskikh pokazateley materialov dlya proizvodstva obuvi spetsial'nogo naznacheniya], *Promyshlennyye protsessy i tekhnologii = Industrial processes and technologies*, № 3 (5), pp. 47–56 (in Russian).

Kechiev, L.N., Pozhidaev, E.D. (2005). *Protection of electronic devices from the effects of static electricity* [Zashchita elektronnykh sredstv ot vozdeystviya staticheskogo elektrichestva], Moscow, Publishing House «Technology», Russian Federation (in Russian).

Morozov, V.A. (2002). Modeling of electrostatic fields using banks of mathematical models and numerical methods [Modelirovaniye elektrostatcheskikh poley s primeneniym bankov matematicheskikh modeley i chislennykh metodov], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika = News of higher educational institutions. Electromechanics*, No. 3. P. 3–5 (in Russian).

Belitskaya, O.A., Fokina, A.A., Belgorodskiy, V.S., Sokolovskiy, A.R., Panferova, E.G. (2023). Integral Assessment of Antistatic Properties of Materials Used in Individual Safety Gear, *Materials Science Forum*, No. 1085, pp. 101–106.

Chowdhury, F, Ray, M., Passalacqua, A., Mehrani, P., Sowinski, A. (2021). Evaluating the electrostatic charge transfer model for particle-particle interactions, *Journal of Electrostatics*, No. 112, pp. 5–9.

Guo, B.Y., Guo, J., Yu, A.B. (2014). Simulation of the electric field in wire-plate type electrostatic precipitators, *Journal of Electrostatics*, Issue 4, pp. 301–310.

Li, J., Yao, J., Zhao, Y., Wang, C-H (2020). Large eddy simulation of electrostatic effect on particle transport in particle-laden turbulent pipe flows, *Journal of Electrostatics*, Volume 109, pp. 199–207.

Rahou, F., Tilmatine, A., Bilici, M., Dascalescu, L. (2013). Numerical simulation of the continuous operation of a tribo-aero-electrostatic separator for mixed granular solids, *Journal of Electrostatics*, Issue 5, pp. 867–874.

Smallwood, J., Swenson, D.E. (2011). Evaluation of performance of footwear and flooring systems in combination with personnel using voltage probability analysis, *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 301, pp. 145–152.

Swenson, D.E. (2015). Footwear and flooring: charge generation in combination with a person as influenced by environmental moisture, *Journal of Physics Conference Series*, Volume 646, pp. 273–281.

Информация об авторах

Information about the authors

Белицкая Ольга Александровна

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», Российская Федерация.
E-mail: belitskaya-oa@rguk.ru

Olga A. Belitskaya

Candidate of Sciences (in Engineering), Associate Professor, Head of Department, Russian State University named after A.N. Kosygin (Technology. Design. Art), Russian Federation.
E-mail: belitskaya-oa@rguk.ru