

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВ ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Научная статья

УДК 677.017.632:687.14

EDN IXNQHQ

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2024-3-65-5-10>

Ольга Александровна Белицкая¹

Татьяна Алексеевна Самойлова²

Петр Алексеевич Севостьянов³

^{1,2,3} Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия

¹ belitskaya-oa@rguk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7808-4027>

² tasamo89@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2727-0011>

³ petrsev46@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9919-5551>

КОМПЬЮТЕРНАЯ ИМИТАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ДЛЯ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

Аннотация. Проведен анализ производственных факторов, оказывающих вредное влияние на здоровье работающих. Установлено, что одним из ведущих является повышенное электростатическое поле, которое возникает при накоплении статического заряда на поверхности материалов. Повышенный уровень электростатического поля может привести к различным негативным последствиям для здоровья работников. Для полноценной антистатической защиты на производстве необходимы не только специальные инструменты и рабочие места, но и специальная обувь, сшитая из токопроводящих материалов с высоким поверхностным сопротивлением, а также другие средства индивидуальной защиты. Описана компьютерная модель имитации возникновения и развития электрического пробоя в защитном материале для средств индивидуальной защиты. Модель основана на энергетических представлениях о возникновении и развитии разряда с учетом статистической неоднородности электропроводимости материала. Процесс развития пробоя рассматривается как частный случай перколяционного эффекта и ветвящегося случайного процесса. Модель позволяет найти взаимосвязь между неоднородностью материала и порогом его защитных свойств.

Ключевые слова: диэлектрик, проводимость, электрический заряд, электростатическое поле, пробой, перколяция, средства защиты, ветвящиеся процессы, вероятностные процессы, компьютерная имитация, метод конечных элементов

Для цитирования: Белицкая О. А., Самойлова Т. А., Севостьянов П. А. Компьютерная имитация электропроводных свойств материала для средств индивидуальной защиты // Технологии и качество. 2024. № 3(65). С. 5–10. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2024-3-65-5-10>.

Original article

Olga A. Belitskaya¹

Tatiana A. Samoilova²

Petr A. Sevostyanov³

^{1,2,3} Kosygin Russian State University (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia

COMPUTER SIMULATION OF ELECTRICALLY CONDUCTING PROPERTIES OF MATERIAL FOR PERSONAL PROTECTION EQUIPMENT

Abstract. The article presents an analysis of production factors that have a harmful effect on the health of workers. It has been established that one of the leading factors is an increased electrostatic field that occurs

© Белицкая О. А., Самойлова Т. А., Севостьянов П. А., 2024

when a static charge accumulates on the surface of materials. An increased level of the electrostatic field can lead to various negative consequences for workers' health. For full antistatic protection at work, not only special tools and workplaces are needed, but also special footwear made of conductive materials with high surface resistance, as well as other personal protective equipment. A computer model for simulating the occurrence and development of an electrical breakdown in a protective material for personal protective equipment is described. The model is based on energy concepts of the occurrence and development of a discharge, taking into account the statistical heterogeneity of the material's electrical conductivity. The process of breakdown development is considered as a special case of the percolation effect and a branching random process. The model makes it possible to find a relationship between the heterogeneity of the material and the threshold of its protective properties.

Keywords: dielectric, conductivity, electric charge, electrostatic field, breakdown, percolation, protection means, branching processes, probabilistic processes, computer simulation, finite element method

For citation: Belitskaya O. A., Samoilova T. A., Sevostyanov P. A. Computer simulation of electrically conducting properties of material for personal protection equipment. *Technologies & Quality*. 2024. No 3(65). P. 5–10. (In Russ.). <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2024-3-65-5-10>.

В группе производственных факторов, оказывающих вредное влияние на здоровье работающих, одним из ведущих является повышенное электростатическое поле (ЭСП), которое возникает при накоплении статического заряда на поверхности материалов [1–4]. В некоторых отраслях производства, таких как нефтегазоперерабатывающая промышленность, ЭСП может стать серьезной проблемой [5]. При работе с нефтепродуктами, например, может возникать трение, вызывающее накопление заряда и формирование высокого уровня ЭСП – до 300 кВ/м и выше, при допустимом уровне 15 кВ/м.

Повышенный уровень ЭСП может привести к различным негативным последствиям для здоровья работников. Например, статический заряд может приводить к поражению электрическим током, что представляет опасность для жизни и здоровья [6]. Кроме того, ЭСП может способствовать образованию взрывоопасных смесей, что увеличивает риск возгорания и взрыва [7].

Контроль уровня ЭСП и принятие соответствующих мер безопасности играют важную роль в обеспечении здоровья и безопасности работников в отраслях производства, где этот фактор представляет угрозу.

Для полноценной антистатической защиты на производстве необходимы не только специальные инструменты и рабочие места, но и специальная обувь, сшитая из токопроводящих материалов с высоким поверхностным сопротивлением, а также другие средства индивидуальной защиты. Важно проводить регулярную проверку оборудования на предмет соответствия нормам безопасности и проводить антистатическую обработку рабочих поверхностей.

Специализированная обувь является многокомпонентной конструкцией, ее антистатические свойства формируются за счет материалов

отдельных деталей обуви, которые изготавливаются из композитных волокнисто-пористых, тканых и нетканых материалов [8]. Часто обувь изготавливается из материалов, которые предотвращают или ограничивают поток электронов через свою поверхность или через свой объем из-за чрезвычайно высокого электрического сопротивления [9]. Такие материалы называются диэлектриками. На их поверхности может генерироваться значительное количество зарядов, но поскольку изоляционный материал не позволяет электронам быстро стекать, положительные и отрицательные заряды находятся на изолирующей поверхности одновременно, хотя и в разных местах. Избытка электронов в отрицательно заряженном месте может быть достаточно, чтобы компенсировать отсутствие электронов в положительно заряженном месте. Однако электроны не могут легко проходить по поверхности изоляционного материала и оба заряда могут оставаться на месте в течение очень долгого времени.

Поэтому изучение электропроводных свойств материалов является актуальным направлением, а методы компьютерного моделирования, которые позволяют имитировать возникновение и развитие электрического пробоя в материале, дают основу для понимания процесса статической электризации различных материалов и могут послужить основой для проектирования новых материалов с уникальными характеристиками.

При малых разностях потенциалов U диэлектрический материал практически не пропускает тока. Однако при нарастании разности потенциалов в материале происходят структурные изменения, которые в конечном итоге приводят к электрическому пробоя, причем в возникновении пробоя существенную роль играет неоднородность материала.

В окрестности локальных участков неоднородности возникает повышенный градиент потенциала, т. е. значительно возрастает напряженность поля. При этом происходит и повышенное выделение энергии, отдаваемой движущимися зарядами в материал в рассматриваемой локальной области. Под действием напряженности и выделяемой энергии происходят структурные изменения в материале, локальная проводимость материала возрастает, и электрический ток в этой области превышает ток в соседних областях материала. Возникающий эффект положительной обратной связи распространяется на соседние участки с большей, чем у соседних участков, проводимостью – возникает канал распространения электрического разряда с повышенной проводимостью между пластинами с приложенной разностью потенциалов. Детально процесс развития токопроводящего канала при пробое диэлектрического материала описан в литературе [10].

На основе описанного представления была разработана компьютерная модель имитации возникновения и развития пробоя в слое диэлектрика. Ниже приведен в обобщенной форме алгоритм имитации.

1. На границе образца материала отыскивается участок с наибольшей локальной прово-

димостью. С этого участка и начинается канал пробоя.

2. В окрестности найденного участка отыскивается участок с наибольшей среди соседних участков локальной проводимостью. В этот участок и распространяется канал пробоя.

3. Подсчитываются потери энергии зарядов, протекающих в следующий участок, и приобретение энергии за счет новых подвижных зарядов, включившихся в движение. Если энергетический баланс приводит к ситуации полной потери энергии, то пробой прекращается и не распространяется далее вглубь материала.

4. Пункты 2 и 3 алгоритма повторяются, пока участки с движущимися зарядами не достигнут противоположной границы материала или не прекратят распространение из-за недостатка энергии.

5. Описанный в пп. 1–4 прогон имитационной модели повторяют многократно, накапливая статистические данные и оценки по прогонам.

На рис. 1 показаны пять реализаций траекторий каналов пробоя в образце материала с толщиной $H = 100$ мм для двумерной модели пробоя. Все траектории начинаются из одной и той же точки ($x = 0$; $y = 0$). Три траектории из пяти не достигли противоположной границы, т. е. пробоя не произошло.

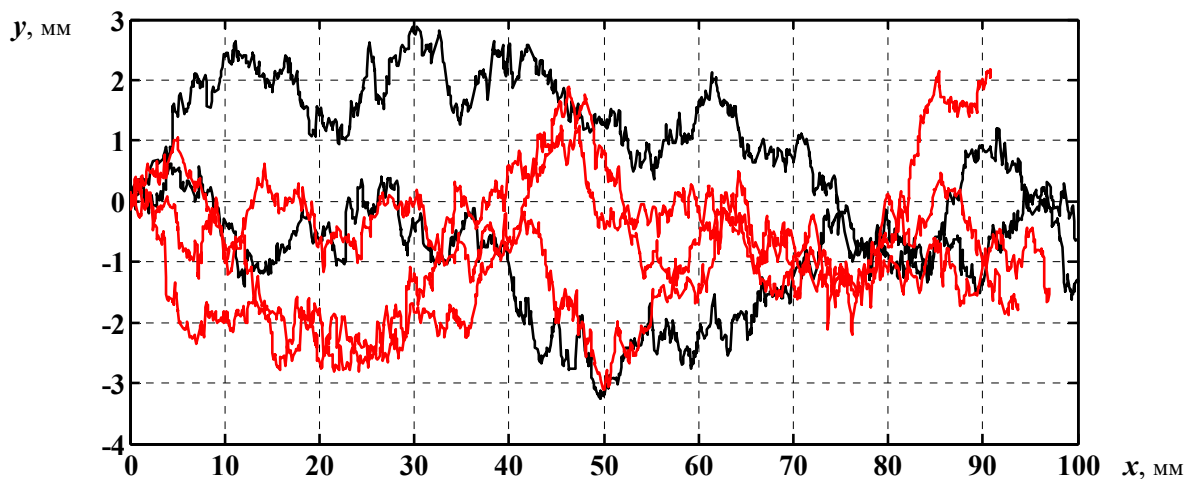


Рис. 1. Примеры траекторий движения электрических зарядов под действием внешнего статического поля на уровне напряжения пробоя

Эта специфика пробоя показана на рис. 2, откуда видно, что вероятность пробоя, т. е. доля траекторий движения зарядов, достигающих противоположной стороны образца, скачкообразно изменяется при изменении уровня пробойного потенциала в пределах от 0,43 до 0,47 от внешнего приложенного потенциала.

Этот график подтверждается результатами, полученными в эксперименте с защитной обувью (рис. 3). Человек с закрепленным на нем измери-

телем потенциала относительно заземления сначала двигался по ковровому покрытию. При этом происходило накопление статического заряда вследствие взаимодействия покрытия с обувью. Этот потенциал не удерживался, поэтому первые 50 отсчетов величина потенциала подвержена значительным случайным вариациям. Затем движение по ковру прекращается, и накопленный потенциал в виде «тихого» разряда – пробоя стекает по наиболее проводящим путям от чело-

века к заземлению и снижается практически до нуля, причем стекание происходит практически мгновенно, что соответствует высокой, близкой к единице, вероятности пробоя – разряда.

С помощью построенной модели было выполнено исследование зависимости вероятности пробоя от неоднородности материала. Варьировался коэффициент вариации локального удельного сопротивления участков образца, которому задавались значения: $CVr = 0,1; 1; 5; 10; 25; 50\%$.

При этих значениях коэффициента вариации исследовались значения относительного сопротивления Rc материала вдоль траектории канала пробоя по отношению к его среднему значению для моделируемого образца и вариации

этого относительного сопротивления. Количество повторных прогонов модели – 10 000 прогонов – оказалось достаточным, чтобы для каждого уровня CVr обеспечить не менее чем 5-процентную точность оценивания.

Распределение выборочных значений сохранило заметную долю выбросов в большую и меньшую стороны и существенно отличалось от нормального закона. Поэтому были использованы робастные характеристики: для среднего значения относительного сопротивления – медиана $meRc$, а в качестве характеристики вариации – интердецильный размах относительного сопротивления $WdRc$. Результаты оценивания приведены в таблице.

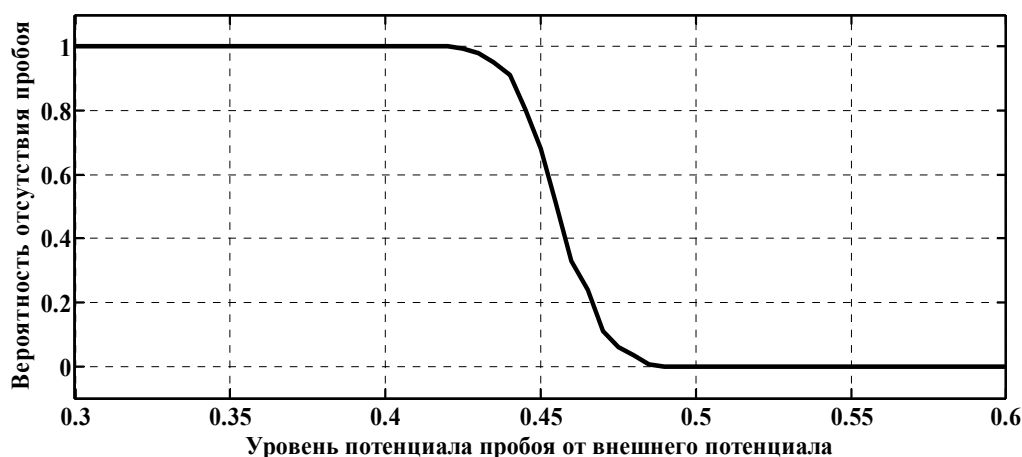


Рис. 2. Зависимость вероятности отсутствия пробоя от соотношения между приложенным потенциалом и граничным потенциалом пробоя

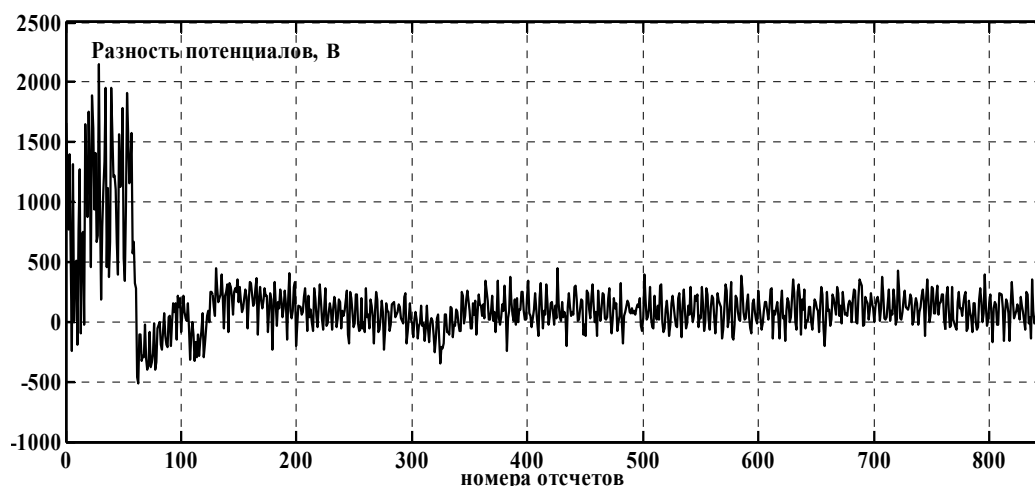


Рис. 3. Разность потенциалов между заземленной поверхностью коврового покрытия и одеждой человека

Т а б л и ц а

Зависимость среднего значения относительного сопротивления и коэффициента вариации сопротивления вдоль канала пробоа от неравномерности сопротивления материала

<i>CVr, %</i>	<i>meRc</i>	<i>Wdr, %</i>
0,1	0,9991	0,00008
1,0	0,9915	0,00078
5,0	0,9575	0,0041
10,0	0,9150	0,0080
25,0	0,7872	0,0197
50,0	0,5991	0,0369

Из таблицы следует, что с увеличением неоднородности материала по удельному электрическому сопротивлению фактическое сопротивление движению электрических зарядов снижается по сравнению со средней измеренной величиной. Возрастает вариабельность этого фактического сопротивления. Однако эти эффекты заметно проявляются лишь при очень больших вариациях удельного сопротивления. Заметим, что если материал неоднороден в силу технологии изготовления, например токопроводящие лакуны, то его фактическое сопротивле-

ние существенно меньше сопротивления этого же материала «в чистом виде».

ВЫВОДЫ

1. Разработана компьютерная модель протекания потока электрических зарядов сквозь диэлектрический материал.

2. Модель согласуется с результатами натурных экспериментов по пробою защитных материалов одежды и обуви.

3. Модель позволяет исследовать влияние особенностей структуры и свойств материала на его сопротивление электрическому пробою.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кечиев Л. Н., Пожидаев Е. Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. М. : Технологии, 2005. 352 с.
2. Белицкая О. А., Леденева И. Н. Основы моделирования трибоэлектрических свойств материалов для обуви : монография. М. : МГУДТ, 2014. 91 с.
3. Изгородин А. К., Семикин А. П. Электризация волокнистых материалов. Иваново : ИГТА, 2002. 200 с.
4. Ушакова Н. С., Брюхов Г. М. Методы индивидуальной защиты на предприятии // Рабочая одежда и средства индивидуальной защиты. 2005. № 4(31).
5. Концепция потенциальной электромагнитной безопасности / Ю. Г. Рябов, З. С. Салихов, О. Н. Шологин, А. И. Мурашов, А. А. Котляров // Экология и промышленность России. 2005. № 7. С. 42–45.
6. Egan S. Learning lessons from five electrostatic incidents // Special Issue on The International Conference on Electrostatics, Electrostatics 2017 / edited by Klaus Schwenzfeuer. 2017. Vol. 88. P. 183–189.
7. A case study of electrostatic accidents in the process of oil-gas storage and transportation / Hu Yuqin, Diansheng Wang, Jinyu Liu, Jianshen Gao // Journal of Physics: Conference Series 418. 2013. DOI: 10.1088/1742-6596/418/1/012037.
8. Testing the Electrical Resistance of Materials for Protective Footwear Production / O. A. Belitskaya, A. A. Fokina, E. S. Rykova, E. G. Panferova // International Science and Technology Conference (FarEastCon 2020), IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1079, chapter 4. DOI:10.1088/1757-899X/1079/5/052067.
9. Белицкая О. А. Антистатическая обувь: состояние производства и его перспективы : монография. М. : РГУ им. А. Н. Косыгина, 2022. 189 с.
10. Сканави Г. И. Физика диэлектриков (Область сильных полей). М. : Гос. изд-во физ.-матем. лит., 1958. 907 с.

REFERENCES

1. Kechiev L. N., Pozhidaev E. D. Protecting electronic equipment from static electricity. Moscow, Technology Publ., 2005. 352 p. (In Russ.)
2. Belitskaya O. A., Ledeneva I. N. Fundamentals of modeling triboelectric properties of materials for footwear. Moscow, Moscow St. Univ. Design and Technol. Publ., 2014. 91 p. (In Russ.)

3. Izgorodin A. K., Semikin A. P. Electrification of fibrous materials. Ivanovo, Ivanovo St. tekstil. akadem. Publ., 2002. 200 p. (In Russ.)
4. Ushakova N. S., Bryukhov G. M. Methods of personal protection at the enterprise. *Rabochaja odezhda I sredstva individual'noj zashchity* [Work clothes and personal protective equipment]. 2005;4(31). (In Russ.)
5. Ryabov Yu. G., Salikhov Z. S., Shologin O. N., Murashov A. I., Kotlyarov A. A. Concept of potential electromagnetic safety. *Jekologija i promyshlennost' Rossii*. [Ecology and industry of Russia]. 2005,7:42–45. (In Russ.)
6. Egan S. Learning lessons from five electrostatic incidents. Special Issue on The International Conference on Electrostatics, Electrostatics 2017, Edited by Klaus Schwenzfeuer. 2017;88:183–189.
7. Yuqin Hu, Diansheng Wang, Jinyu Liu, Jianshen Gao. A case study of electrostatic accidents in the process of oil-gas storage and transportation. *Journal of Physics: Conference Series* 418. 2013. DOI: 10.1088/1742-6596/418/1/012037.
8. Belitskaya O. A., Fokina A. A., Rykova E. S., Panferova E. G. Testing the Electrical Resistance of Materials for Protective Footwear Production. International Science and Technology Conference (FarEastCon 2020), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021;1079,4. DOI:10.1088/1757-899X/1079/5/052067.
9. Belitskaya O. A. Antistatic footwear: state of production and its prospects. Moscow, Rus. St. Univ. named after A. N. Kosygin Publ., 2022. 189 p. (In Russ.)
10. Scanavi G. I. Physics of dielectrics (Region of strong fields). Moscow, St. Publ. house of physics and mathematics. lit., 1958. 907 p. (In Russ.)

Статья поступила редакцию 26.06.2024
Принята к публикации 23.09.2024