

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

*На правах рукописи*

УДК 612.014.42:331.344.2

КЛИМОВИЧ  
Денис Михайлович

**ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРИЗАЦИИ  
ОДЕЖДЫ ОПЕРАТОРА**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание степени  
магистра техники и технологий

по специальности 1-39 81 01 – Компьютерные технологии  
проектирования электронных систем

Минск 2016

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **ПИСКУН Геннадий Адамович**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент: **БОНДАРИК Василий Михайлович**,  
кандидат технических наук, доцент, декан факультета непрерывного и дистанционного обучения учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «24» июня 2016 г. года в 9<sup>00</sup> часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, Минск, ул. П.Бровки, 6, копр. 1, ауд. 415, тел. 293-20-80, e-mail: kafpiks@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

СОГЛАСОВАНО:

\_\_\_\_\_ Г.А. Пискун  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

## **ВВЕДЕНИЕ**

В современном мире промышленность занимает основную позицию в развитии человечества, соответственно в данном направлении задействовано большое количество людей. Одной из основных задач, помимо самого производства, является сохранение людских жизней. Человеку на производстве, особенно в сфере тяжелой промышленности, угрожает немало факторов: огонь, ядовитые газы, радиация, химические элементы и другие. Стоит также отметить такой фактор, как электростатический разряд (ЭСР), который является очень опасным для жизни человека, т.к. при определенных условиях накопленный заряд на одежде может привести к появлению случайной искры, которая, в свою очередь, при взаимодействии с окружающей средой может спровоцировать взрыв, возгорание и т.д. Исследование процесса электризации, протекающего на одежде оператора, а также исследование математических моделей, характеризующих данный эффект, является достаточно актуальной задачей, т.к. в современном мире присутствует большое изобилие материалов и тканей, которые при взаимодействии с человеком могут накапливать заряд различного напряжения.

На настоящий момент существует достаточно большое количество работ российских и отечественных исследователей, рассматривающих влияние статического электричества на полупроводниковые приборы и процесс электризации одежды оператора, в которых содержатся результаты математического моделирования (Горлов М.И., Каверзнев В.А., Кечиев Л.Н., Князев А.Д., Алексеев В.Ф., Пискун Г.А.). Особое внимание заслуживают работы таких зарубежных авторов, как А. Amerasekera, О. Semenov и Steven H. Voldman и т.д.

В исследованиях, представленных в научно-технической литературе, приведены результаты, подтверждающие негативное воздействие разрядов статического электричества от оператора. Однако исследованию математических моделей не уделяется должного внимания. Среди существующих математических моделей оператора исследование воздействия разряда статического электричества присутствует только для некоторых типов одежды, либо присутствует исследование идеализированных ситуаций с множеством допущений. В этой связи исследования по теме диссертации, направленные на разработку численных моделей электризации одежды оператора, являются своевременными и актуальными.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Важнейшим этапом оценки электризации одежды оператора является расчет потенциальных полей в средах работы оператора, а также на сопрягающихся границах сред, имеющих различные электрические свойства.

Известно, что различные материалы имеют различные электрические свойства, а также при определенных контактах материалов может происходить накопление заряда на одежде оператора, что может привести к неожиданным последствиям.

Таким образом, актуальной является задача совершенствования и оптимизации существующих методик оценки электризации одежды оператора, что позволит более точно определять допустимые нормы при работе с оборудованием при выполнении различных операций.

### **Степень разработанности проблемы**

Исследование влияния электростатических разрядов от оператора осуществлялось на основе построения теоретических моделей с использованием работ российских и белорусских ученых: М.И. Горлова, В.А. Емельянова, Л.П. Ануфриева, В.Ф. Алексеева, Г.А. Пискуна, Л.Н. Кечиева, Е.Д. Пожидаева, В.А. Каверзнева, Г.Д. Грошева, а так же зарубежных авторов: Ч. Джоввета, Кая Есмарка, А. Шваба, Э. Хабигера, Steven H. Voldman и др.

Одним из недостатков исследований, представленных в современной технической литературе, является неполное рассмотрение всех внешних факторов и условий для моделирования процесса электризации одежды оператора в целом.

Предложенное исследование направлено на устранение этого недостатка на основе модификации алгоритма моделирования процессов электризации одежды оператора.

### **Цель и задачи исследования**

Цель диссертационной работы состоит в разработке численной модели электризации одежды оператора при выполнении различных операций, учитывающей физико-химические свойства волокон ткани.

Поставленная цель работы определяет следующие основные задачи:

1. Систематизация и анализ текущего состояния проблемы и возможность разработки новых математических моделей электризации оператора с учетом физико-химических особенностей волокон ткани одежды.

2. Разработка численной модели электризации оператора с учетом особенностей одежды.

3. Моделирование процесса трибоэлектризации оператора с учетом особенностей выполняемых операций.

### **Область исследования**

Содержание диссертации соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-38 81 01 «Компьютерные технологии проектирования электронных систем».

### **Теоретическая и методологическая основа исследования**

В основу диссертации легли работы белорусских и зарубежных ученых по изучению процесса электризации одежды оператора, а также анализ технических нормативных правовых актов по рассматриваемой тематике.

*Информационная база* исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

## **Научная новизна**

*Научная новизна* и значимость полученных результатов работы заключается в построении численной модели электризации одежды оператора с учетом современных факторов на производстве. Стоит подчеркнуть отдельно, что численная модель процесса электризации одежды оператора также строится в зависимости от физико-химических свойств одежды оператора. Была показана модель трибоэлектризации оператора с учетом особенностей выполняемых операций.

*Теоретическая значимость* работы заключается в детальном анализе протекающих процессов электризации оператора с учетом современных материалов и разработке численной модели электризации оператора с учетом особенностей одежды.

*Практическая значимость* диссертации состоит в разработанной численной модели электризации одежды оператора, которая учитывает воздействие электростатических разрядов на предметы из окружающей среды в зависимости от свойств материала и геометрических форм поверхности одежды.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Классификация математических моделей электризации одежды оператора, основанная на анализе решения задач моделирования физических полей в кусочно-однородных и многослойных средах, позволяющая детально представить процесс электризации на сопрягающихся границах с различными свойствами.

2. Численная модель электризации оператора с учетом особенностей одежды, основанная на анализе физико-химических свойств и строения волокон ткани, позволяющая повысить точность расчета напряженности электрического поля в 2 раза.

3. Модель процесса трибоэлектризации оператора с учетом особенностей выполняемых операций, построенная на базе расчета трехмерного электростатического поля вблизи человека, позволяющая определить распределение потенциала по поверхности одежды, распределение напряженности электрического поля, а также рассчитать плотность энергии электрического поля.

## **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на следующих республиканских и международных конференциях и семинарах: 52-я научно-техническая конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, Беларусь, 2016 г.

## **Публикации**

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 6 печатных работах. В их числе 2 статьи в сборниках материалов научных конференций, 4 тезиса докладов на научных конференциях.

Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 15 страниц.

## **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения и библиографического списка.

**В первой главе** приведен обзор современного состояния проблемы электризации одежды оператора, а также рассмотрена возможность разработки новых математических моделей электризации оператора с учетом физико-химических особенностей волокон ткани одежды. **Во второй главе** представлена разработанная численная модель электризации оператора с учетом особенностей одежды, которая построена с учетом анализа физико-химических свойств и строения волокон ткани. **В третьей главе** разработана модель процесса трибоэлектризации оператора с учетом особенностей выполняемых операций, которая построена на базе расчета трехмерного электростатического поля вблизи человека, с помощью которой можно определить распределение потенциала по поверхности одежды, распределение напряженности электрического поля, а также рассчитать плотность энергии электрического поля. **В приложении** представлены публикации автора и акт внедрения.

Общий объем диссертационной работы составляет 91 страниц. Из них 61 страницы основного текста, 21 иллюстрация на 5 страницах, 3 таблицы на 1 странице, библиографический список из 102 наименований на 4 страницах, список собственных публикаций соискателя из 6 наименований на 1 странице, приложений на 19 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы электризации одежды оператора, указаны основные направления исследований, проводимых по данной тематике, а также описано обоснование актуальности темы диссертации.

**В общей характеристике работы** показана актуальность проводимых исследований, степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи диссертации, обозначена область исследований, научная (теоретическая и практическая) значимость исследований, а также апробация работы.

**В первой главе** приведен обзор современного состояния проблемы электризации одежды оператора, а также рассмотрена возможность разработки новых математических моделей электризации оператора с учетом физико-химических особенностей волокон ткани одежды.

Показано, что электризация одежды это неизбежный процесс, т.к. в условиях эксплуатации текстильные материалы постоянно испытывают трение о внешние предметы, кожный покров и другие материалы, составляющие пакет одежды. В результате динамического взаимодействия на контактирующих поверхностях накапливаются электрические заряды, которые могут привести к разряду статического электричества.

Установлено, что величина накапливающегося заряда зависит от электрических свойств материала (электрическая проводимость вещества, энергия связи носителей заряда в веществе, диэлектрическая проницаемость вещества), темпера-

туры, влажности окружающей атмосферы, и состояния материала (строение ткани, загрязнения и извитость волокон, влажность), которые в совокупности определяют электрическое сопротивление материала. Наличие разного рода загрязнений и увлажнение материала уменьшают электризуемость одежды.

Важными факторами, влияющими на электризацию, являются влажность воздуха и скорость относительного движения контактирующих поверхностей.

При незначительной влажности воздуха, когда электрическое сопротивление ткани велико, стекание электрического заряда с наэлектризованной одежды происходит посредством искрового разряда между ней и металлическими, диэлектрическими частями оборудования или землей. Энергия такой электрической искры может оказаться достаточной для воспламенения горючей или взрывоопасной смеси.

Показано, что электрические заряды в материалах могут возникать при разрыве контакта между ними, при деформации материалов, при их трении друг о друга. Кроме того, они могут возникать при получении этих материалов, их переработке и эксплуатации. При соприкосновении двух тел (контакте) происходит перераспределение зарядов, и, когда тела разъединяются, это неравномерное распределение зарядов на них сохраняется.

Чаще всего эти заряды сами по себе постепенно разряжаются, и их присутствие остается незаметным. Но при определенных условиях заряд остается в предметах и даже может накапливаться. Тогда в них образуется статическое электричество, интенсивность которого зависит, в первую очередь, от сочетания предметов, находившихся в контакте, электропроводности материалов, размера и количества точек соприкосновения, а также от скорости разъединения двух предметов.

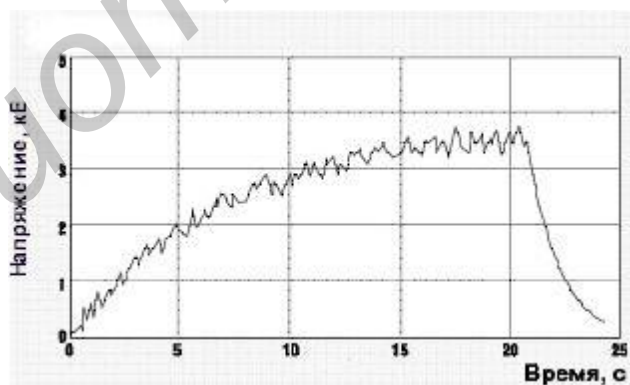


Рисунок 1 – Электрическое напряжение тела человека, идущего по изоляционному (диэлектрическому) покрытию

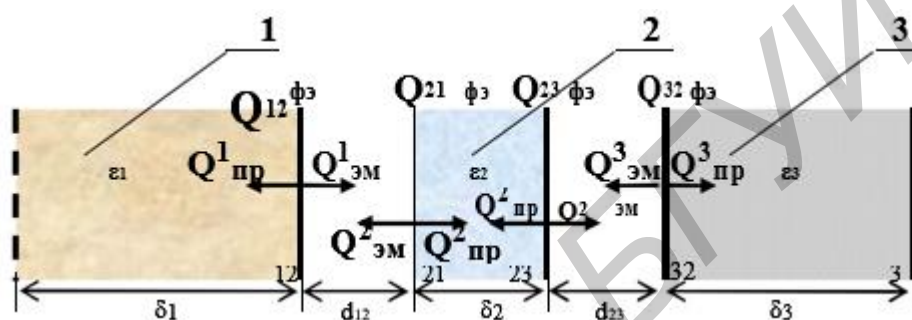
Особое внимание при электризации трением стоит уделять тому факту, что увеличению заряда способствует использование кресел с синтетическим покрытием, трение одежды о сидение и другие факторы. Всё это может привести к внезапному повышению напряжения.

**Во второй главе** представлена численная модель электризации оператора с учетом особенностей одежды, которая построена с учетом анализа физико-химических свойств и строения волокон ткани.

Одежда имеет сложную геометрическую форму поверхности, меняющуюся в процессе эксплуатации при динамических движениях человека, которые он совершает во время выполнения работ в условиях электростатической напряженности на производстве.

Учет особенностей геометрии поверхности одежды и ее изменение в динамике при расчетах уровня элетризации таких объектов представляет в настоящее время достаточно актуальную и недостаточно проработанную задачу.

Для наглядного представления процессов перераспределения электростатических зарядов между контактирующими поверхностями перейдем к сечению теплозащитного пакета плоскостью, проходящей через основную опорную ось (позвоночного столба) рассмотрим рисунок 2.



**Рисунок 2 – Схема перераспределения электростатических зарядов между взаимодействующими диэлектрическими слоями системы «Человек-Одежда» и воздушными прослойками**

На величину накапливающегося заряда влияют электрические свойства материала (электрическая проводимость вещества, энергия связи носителей заряда в веществе, диэлектрическая проницаемость вещества), состояние материала (строение ткани, загрязнения и извитость волокон, влажность), которые в совокупности определяют электрическое сопротивление материала, состоящего из волокон различных или однородных физико-химических свойств.

Накопление заряда на поверхности одежды в значительной мере зависит от самой поверхности и ее формы. Поверхность одежды должна преимущественно быть гладкой, обтекаемой для того, чтобы не препятствовать стеканию заряда с одежды в окружающую среду, так как известно, что заряд накапливается в углах, которые образуются в виде всевозможных заломов одежды. Поэтому образование сгустков поверхностных электростатических зарядов на одежде неизбежно.

Согласно концепции вторичных источников, расчет поля в кусочно-однородной среде сводится к расчету поля в однородной среде. Это достигается введением простого слоя связанных зарядов плотности  $\sigma_{св}$ . Проводя комплекс математических вычислений с учетом введенных допущений и с учетом параметров форм и ограничений элементов системы «человек-одежда», получены выражения (1) для поверхностной плотности свободного заряда:



$$\begin{aligned} \sigma(Q) - \lambda \oint_S \sigma(M) \frac{\cos(\vec{r}_{MQ}, \vec{n}_Q)}{r_{MQ}^2} dS_M = \\ = \lambda \sum_{k=1}^n \int P_k(N) \frac{\cos(\vec{r}_{NQ}, \vec{n}_Q)}{2\pi r_{NQ}^2} dV_N + \lambda \sum_{k=1}^m \int P_k(N) \frac{\cos(\vec{r}_{NQ}, \vec{n}_Q)}{2\pi r_{NQ}^2} dV_N, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\sigma(Q)$  плотность слоя связанных зарядов конечных точек;  
 $\sigma(M)$  плотность слоя связанных зарядов начальных точек;  
 $dS_M$  площадь контактируемых точек.

Согласно методу вторичных источников необходимо вначале из интегрального уравнения (1) определить распределение плотности связанных зарядов  $\sigma(M)$ , после чего напряженность находится из соотношения (2):

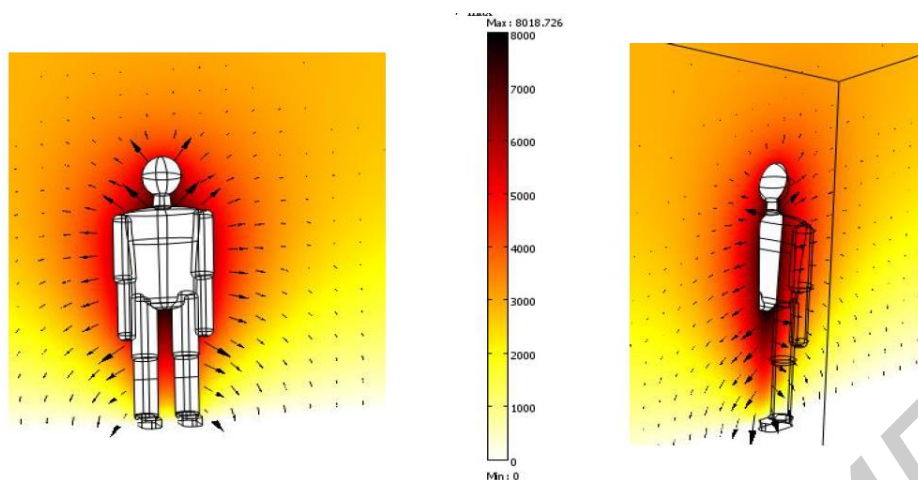
$$\begin{aligned} \vec{E}(Q) = \frac{1}{4\pi\epsilon_e} \oint_S \sigma(M) \frac{\vec{r}_{MQ}}{r_{MQ}^3} dS_M + \frac{1}{4\pi\epsilon_e} \left[ \sum_{k=1}^n \int P_k(N) \frac{\cos(\vec{r}_{NQ}, \vec{n}_Q)}{2\pi r_{NQ}^2} dV_N + \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^m \int P_k(N) \frac{\cos(\vec{r}_{NQ}, \vec{n}_Q)}{2\pi r_{NQ}^2} dV_N \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $E(Q)$  напряженность искомого поля;  
 $P_k(N)$  потенциал кусочно-однородной среды;  
 $dV_N$  объем кусочно-однородной среды  
 $r_{NQ}$  радиус пересечения искомого и начальных точек в среде.

Таким образом, математические выражения (1) и (2) представляют собой аналитическое решение для определения вектора напряженности электростатического поля, возникающего в результате электризации многослойного пакета материалов одежды, который, с точки зрения физики, представляет собой кусочно-однородную среду.

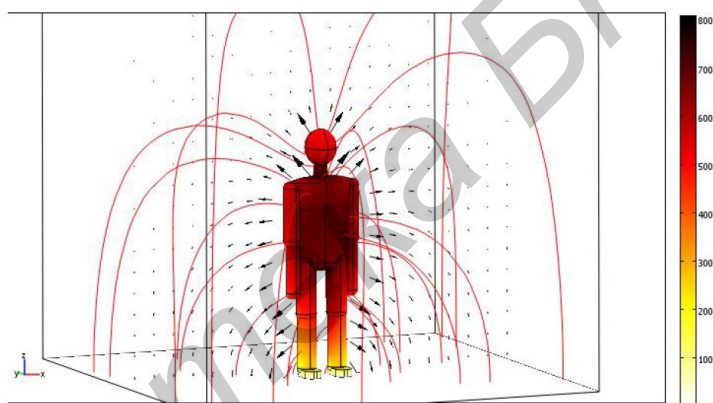
**Третья глава** посвящена разработке модели процесса трибоэлектризации оператора с учетом особенностей выполняемых операций, построенной на базе расчета трехмерного электростатического поля вблизи человека.

Для проведения экспериментальных исследований была использована функция и средства костюма с непрерывным контролем электростатического поля на поверхности одежды. На рисунке 3 показано полученное расчетным путем распределение электрического потенциала  $\varphi$  (в оттенках серого) и вектора напряженности электрического поля  $E = -grad(\varphi)$  (стрелками) вблизи человека в полимерной одежде при заданной равномерно распределенной плотности поверхностного заряда на этой одежде  $\sigma S = 10^{-7}$  Кл/м<sup>2</sup>.



**Рисунок 3 – Распределение электрического потенциала и вектора напряженности электрического поля**

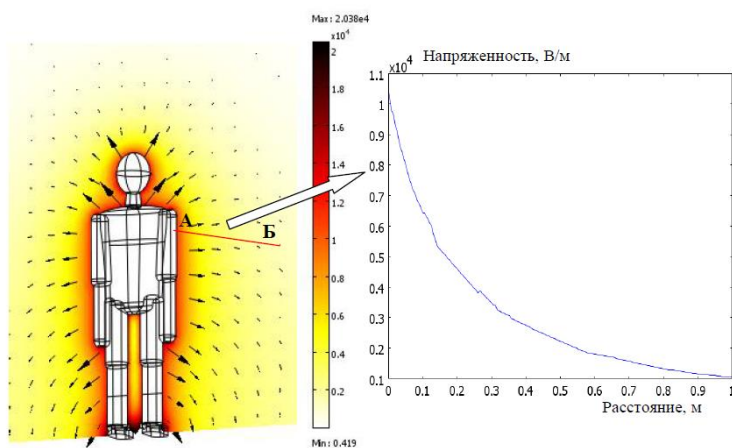
На рисунке 4 показано распределение потенциала по поверхности одежды при этом же поверхностном заряде.



**Рисунок 4 – Распределение потенциала по поверхности одежды**

Из приведенных на этих рисунках результатов видно, что наибольшее значение потенциала достигается в области грудной клетки и шеи человека и составляет около 8 кВ. Силовые линии электрического поля начинаются на поверхности одежды и уходят к заземленной плоскости куба – к основанию, на котором стоит человек.

На рисунках 5 показано распределение напряженности электрического поля  $E$  вблизи человека при заданной равномерно распределенной плотности поверхностного заряда на одежде  $\sigma S = 10^{-7}$  Кл/м<sup>2</sup>. Известно, что величина напряженности электрического поля на поверхности одежды в силу принятого постоянного значения  $\sigma S$  во всех точках поверхности одежды будет иметь постоянное значение. Результаты расчета представлены на рисунке 5.

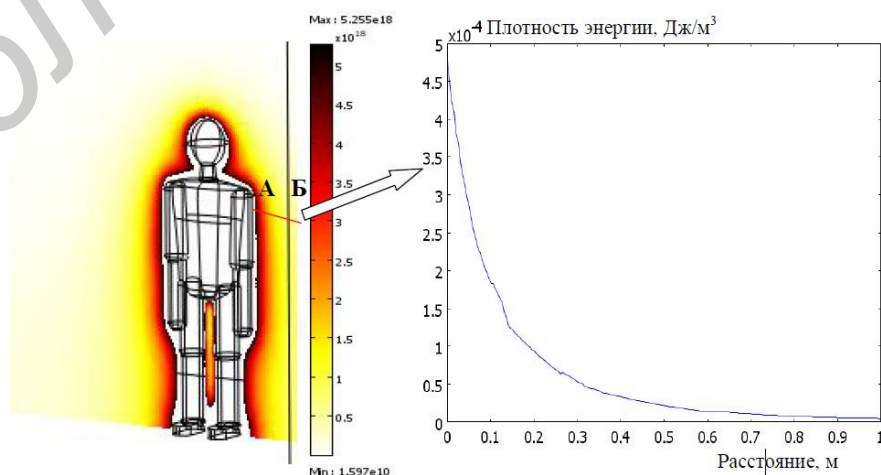


**Рисунок 5 – Распределение напряженности электрического поля вблизи человека при заданной равномерно распределенной плотности поверхностного заряда на одежде**

Видно также, что по мере удаления от поверхности одежды напряженность поля резко снижается. Так, уменьшение напряженности поля в два раза при удалении от поверхности одежды достигается на расстоянии около 20 см. Отсюда можно считать, что электрическое поле локализовано в приповерхностном слое толщиной 20 см.

Отметим, что полученное значение напряженности поля на поверхности одежды 0,01 кВ/мм значительно ниже пробивного напряжения воздуха в однородном поле, составляющего 2,3 кВ/мм. Однако при приближении человека к заземленным металлическим предметам величина электрического поля в зазоре между одеждой и этим предметом будет значительно возрастать и может достигнуть значения напряженности пробоя.

Результаты расчета плотности энергии электрического поля вблизи человека приведены на рисунке 6 и показывают, что наибольшая доля электрической энергии локализована в воздухе вблизи от человека в приповерхностном слое толщиной около 10 см (см. вставку на рисунке 6).



**Рисунок 6 – Расчет плотности энергии электрического поля вблизи человека**

Анализ энергетических характеристик поля необходим при работе человека в спецодежде в специальных условиях. Так, при работе с взрывоопасными средами возникновение электростатических зарядов с последующим возникновением искрового разряда может привести к воспламенению этой среды. Известно, что электростатический разряд может воспламенить горючую смесь только в случае, если его энергия больше минимальной энергии зажигания данной смеси.

При реализации метода конечных элементов в работе использовался пакет программ COMSOL Multiphysics.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Выполнен анализ существующих математических моделей электризации одежды оператора. Показано, что процесс электризации одежды целесообразнее рассматривать через решения задач моделирования физических полей в кусочно-однородных и многослойных средах, что позволяет детально представить процесс электризации на сопрягающихся границах с различными свойствами [1, 2].

2. Разработана численная модель электризации оператора с учетом особенностей одежды. Выявлено, что на анализе физико-химических свойств и строения волокон ткани можно повысить точность расчета напряжения электрического поля в 2 раза (с  $3,0 \times 10^{-6}$  Кл/м до  $6,1 \times 10^{-6}$  Кл/м) [3, 4].

3. Предложена модель процесса трибоэлектризации оператора с учетом особенностей выполняемых операций. Построенная модель на базе расчета трехмерного электростатического поля вблизи человека позволила определить распределение потенциала по поверхности одежды ( $\approx 10^{-7}$  Кл/м), распределение напряженности электрического поля ( $\approx 0,01$  кВ/мм), а также рассчитать плотность энергии электрического поля ( $\approx 0,96$  мкДж). [5, 6].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Полученные результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники в учебный курс «Физические основы проектирования радиоэлектронных средств».

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ**

1. Климович, Д.М. Исследование решений для приборов контроля электростатической безопасности человека / Д.М. Климович, Е.А. Филиппова // Научно-практический журнал «Высшая школа». – 2016. – № 11, часть 1. – С. 107-109.

2. Климович, Д.М. Природа электростатического поля и его влияние на производство / Д.М. Климович, Е.А. Филиппова // Научно-практический журнал «Высшая школа». – 2016. – № 11, часть 2. – С. 86-88.

3. Специфика повреждений, возникающих в кремниевых полупроводниковых изделиях под воздействием электростатических разрядов / Д.А. Дегалевич, Э.М. Врабий, Г.А. Пискун, Д.М. Климович // материалы 52-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 25–30 апреля 2016 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2016. – С.49–50.

4. Принципы нейтрализации электростатических зарядов в радиоэлектронной аппаратуре / Д.А. Дегалевич, Г.А. Пискун, Д.М. Климович, А.Л. Зайцев // материалы 52-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 25–30 апреля 2016 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2016. – С.51–53.

5. Савостеев, Ю.И. Обзор программной среды QUCS / Ю.И. Савостеев, Д.М. Климович, Г.А. Пискун // материалы 52-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 25–30 апреля 2016 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2016. – С.118–120.

6. Савостеев, Ю.И. Разработка схемотехнической модели воздействия НВМ и CDM ЭСР на полевой транзистор с изолированным затвором / Ю.И. Савостеев, Д.М. Климович, Г.А. Пискун // материалы 52-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 25–30 апреля 2016 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2016. – С.121–123.

## РЭЗІЮМЭ

Клімовіч Дзяніс Міхайлавіч

### Лікавая мадэль працэсу электрызацыі адзення аператара

**Ключавыя словы:** электростатычны разрад, электрызацыя.

**Мэта работы:** распрацоўка лікавай мадэлі электрызацыі адзення аператара пры выканаем-нді розных аперацый, якая ўлічвае фізіка-хімічныя ўласцівасці валокнаў тканіны.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** паказана, што працэс электрызацыі адзення мэтазгодней разглядаць чэ-рэз рашэння задач мадэлявання фізічных палёў у кавалкава-аднародных і шматслойных асяроддзях, што дазваляе дэталёва прадставіць працэс электрызуе-цыі на спалучаныя межах з рознымі ўласцівасцямі; выяўлена, што на аналізе фізіка-хімічных уласцівасцяў і будынкі валокнаў тканіны можна павысіць дакладнасць разліку напружання электрычнага поля ў 2 разы (з  $3,0 \times 10^{-6}$  Кл / м да  $6,1 \times 10^{-6}$  Кл / м). пабудаваная мадэль на базе разліку трехмер-нага электростатычнага поля паблізу чалавека дазволіла вызначыць звадзе-дзяленне патэнцыялу па паверхні адзення ( $\approx 10^{-7}$  Кл / м), размеркаванне напружанасці электрычнага поля ( $\approx 0,01$  кВ / мм), а таксама разлічыць шчыльнасці насць энергіі электрычнага поля ( $\approx 0,96$  мкДж).

**Ступень выкарыстання:** вынікі ўкаранёны ў навучальны працэс на кафедры праектравання інфар-най-кам'ютэрных сістэм ўстанова адукацыі "Беларускі дзяр-ны універсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі ў навучальны курс "Фізічныя асновы праектавання радыёэлектронных сродкаў".

**Вобласць ужывання:** паўправадніковая прамысловасць, мікрапрацэсарныя сістэмы.

## РЕЗЮМЕ

Климович Денис Михайлович

### Численная модель процесса электризации одежды оператора

**Ключевые слова:** электростатический разряд, электризация.

**Цель работы:** разработка численной модели электризации одежды оператора при выполнении различных операций, учитывающей физико-химические свойства волокон ткани.

**Полученные результаты и их новизна:** показано, что процесс электризации одежды целесообразнее рассматривать через решения задач моделирования физических полей в кусочно-однородных и многослойных средах, что позволяет детально представить процесс электризации на сопрягающихся границах с различными свойствами; выявлено, что на анализе физико-химических свойств и строения волокон ткани можно повысить точность расчета напряжения электрического поля в 2 раза (с  $3,0 \times 10^{-6}$  Кл/м до  $6,1 \times 10^{-6}$  Кл/м). построенная модель на базе расчета трехмерного электростатического поля вблизи человека позволила определить распределение потенциала по поверхности одежды ( $\approx 10^{-7}$  Кл/м), распределение напряженности электрического поля ( $\approx 0,01$  кВ/мм), а также рассчитать плотность энергии электрического поля ( $\approx 0,96$  мкДж).

**Степень использования:** результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники в учебный курс “Физические основы проектирования радиоэлектронных средств”.

**Область применения:** полупроводниковая промышленность, микропроцессорные системы.

## SUMMARY

**Klimovich Dzianis Mihailovich**

### **Numerical model of the process of electrification clothes operator**

**Keywords:** electrostatic discharge, electrification.

**The object of study:** Development of a numerical model of the operator garment electrification at Run-Research Institute of different operations, taking into account the physico-chemical properties of the fabric fibers.

**The results and novelty:** it is shown that the process of electrification of clothing appropriate to consider the four-cut solutions of physical problems in the fields of modeling of piecewise-homogeneous and multi-media, allowing the process to submit detailed electrification on the mating boundaries with different properties; It revealed that the analysis of the physico-chemical properties and the structure can improve the accuracy of calculation of the electric field strength in the fabric fibers 2 times (from  $3.0 \times 10^{-6}$  C / m to  $6.1 \times 10^{-6}$  C / m). built on the basis of the calculation of three-dimensional modeling of the electrostatic field near the man allowed us to determine the distribution division of the capacity-Ironing surface ( $\approx 10^{-7}$  Coulomb / m), the distribution of electric field strength ( $\approx 0,01$  kV / mm), and calculate the density the energy of the electric field ( $\approx 0,96$  mJ).

**Degree of use:** results are implemented in the educational process at the Department of proektirvoaniya information systems and computer facilities of the Court, "the Belarusian gosu endowment University of Informatics and Radio Electronics in the training course" Physical basis of the design of radio-electronic means. "

**Sphere of application:** semiconductor industry, microprocessor-based systems.