

Л.Д.Трегьякова, канд.техн.наук (Национальный техн. ун-т Украины “КПИ”, Киев), А.Д.Подольцев, докт.техн.наук (Институт электродинамики НАН Украины, Киев)

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ ЧЕЛОВЕКА В ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЕ ИЗ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ НАЛИЧИИ НА НЕЙ ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАРЯДА

*В статье предложена математическая модель и методика численного расчета на основе метода конечных элементов трехмерного электростатического поля вблизи человека при наличии поверхностного заряда на его защитной одежде из полимерного материала. Для определения величины поверхностного заряда были проведены экспериментальные исследования. Приведены результаты численного расчета распределения электрического потенциала и напряженности поля, а также интегральной величины электрической энергии, запасенной в этом поле.*

*У статті запропоновано математичну модель і методику чисельного розрахунку на основі методу кінцевих елементів тривимірного електростатичного поля поблизу людини за наявності поверхневого заряду на його захисному одязі, виготовленому з полімерного матеріалу. Для визначення величини поверхневого заряду були проведені експериментальні дослідження. Наведено результати чисельних розрахунків розподілу електричного потенціалу і напруженості поля, а також інтегральної величини електричної енергії, що запасена в цьому полі.*

**Введение.** Современное промышленное производство предъявляет высокие требования к совершенствованию техники и технологических процессов. Внедрение новых технологических процессов в ряде случаев приводит к возникновению новых факторов, которые могут создавать угрозу здоровью и даже жизни работника. Так, в 2008 году в Украине было травмировано 16206 человек, из них 1005 – смертельно, количество регистрируемых профессиональных заболеваний ежегодно превышает 5000. Для эффективной организации современных систем защиты персонала проводят исследования на производстве возможных вредных и опасных факторов и используют средства защиты, которые могут полностью исключить или минимизировать риски возникновения несчастных случаев и профессиональных заболеваний. Важное место в реализации многоступенчатых систем защиты занимают средства индивидуальной защиты (СИЗ). На сегодняшний день в Украине классифицируется, в зависимости от предназначения, двенадцать основных видов СИЗ, каждый из которых содержит до нескольких десятков типов. Современные комплекты СИЗ защищают от физических, химических и биологических вредных факторов и веществ. Это обеспечивается за счет использования разнообразных искусственных химических материалов, созданных на основе полимеров: полиэтилена, полиэфира, полипропилена, поливинилхлорида, полиуретана и др. Такие материалы имеют разнообразные защитные свойства, высокие физико-механические, диэлектрические и теплоизоляционные характеристики [5]. В условиях многих производств одной из важных сопутствующих проблем является электризация таких изделий за счет различных электрофизических процессов [1,4,6,9].

Традиционно на предприятиях, где электризация материалов препятствует нормальному протеканию технологических процессов или создает дополнительную взрыво- и пожароопасность в результате возникновения искрового разряда, используют изделия, в которых значения объемного и поверхностного сопротивления не превышают определенной предельной величины [10]. Однако в связи с последними достижениями в области нанотехнологии применительно к проблемам защитной одежды [11] актуальной задачей является более детальный анализ электрического поля и электрофизических процессов, происходящих на поверхности и в объеме полимерного материала. Целью статьи является разработка методики расчета электростатического поля на поверхности полимерного материала при наличии апостериорной информации о распределении зарядов.

**Электрические процессы при электризации полимерного материала.** Статическая электризация – это процессы, которые приводят к образованию, разделению и накоплению зарядов разных знаков. Такие взаимодействия стали привлекать внимание очень давно, но в последнее время это стало особенно актуальным, так как в промышленности стали применять материалы с высоким уде-

льным объемным сопротивлением  $\rho_v \approx 10^{12}$  Ом·м и удельным поверхностным сопротивлением  $\rho_s \approx 10^{16}$  Ом. Эти материалы могут сохранять заряд в течение длительного времени, а значит может накапливаться заряд, который увеличивает напряженность электрического поля. При этом могут создаться условия для возникновения самостоятельного разряда и образования электрической искры (пробоя воздушного промежутка).

Статическая электризация, таким образом, может приводить к следующим негативным последствиям:

- возникновению электрического поля, которое воздействует на технологический процесс (например, в текстильной промышленности – увеличение размера нитей в пучке до диаметра 1 м, что затрудняет процесс прядения, в полиграфии – слипание листов бумаги при печатании книг, что приводит к появлению брака);

- возникновению разрядов и опасности взрыва или пожара;

- негативному воздействию на организм человека как электрического поля, так и микроударов, возникающих в таком поле при определенных его значениях, превышающих критические.

Для различных технологических процессов изучают опасные проявления статического электричества. Опасные условия создаются, если:

- в определенном месте происходит накопление заряда;

- заряды создают электрическое поле, достаточное для развития искрового или коронного разряда;

- энергия, выделяемая в канале разряда, оказывается больше, чем минимально необходимая энергия для воспламенения среды.

Величина зарядов статического электричества существенно зависит от внешних условий, в которых происходит электризация, поэтому основой количественного анализа является эксперимент или, в лучшем случае, расчетно-экспериментальные исследования.

**Расчет трехмерного электростатического поля вблизи человека.** Расчет трехмерного электростатического поля, создаваемого вблизи человека в защитной одежде при накоплении на ней поверхностных зарядов, выполнялся в следующей постановке.

1. Формировалась геометрическая модель человека путем объединения различных базовых геометрических фигур. Построенная таким образом конечно-элементная модель показана на рис. 1.

2. Полагалось, что вся поверхность человека покрыта полимерным материалом толщиной 0,15 мм, что соответствует фактической толщине используемых материалов. На поверхности материала вследствие трения или индукционного влияния образовался поверхностный заряд с плотностью  $\sigma_s(x, y, z)$ . Величина этого заряда в общем случае является функцией как пространственных координат.

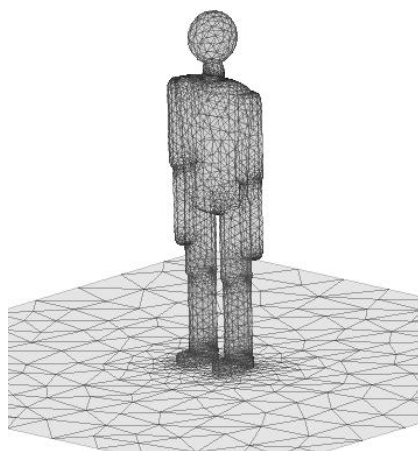


Рис. 1

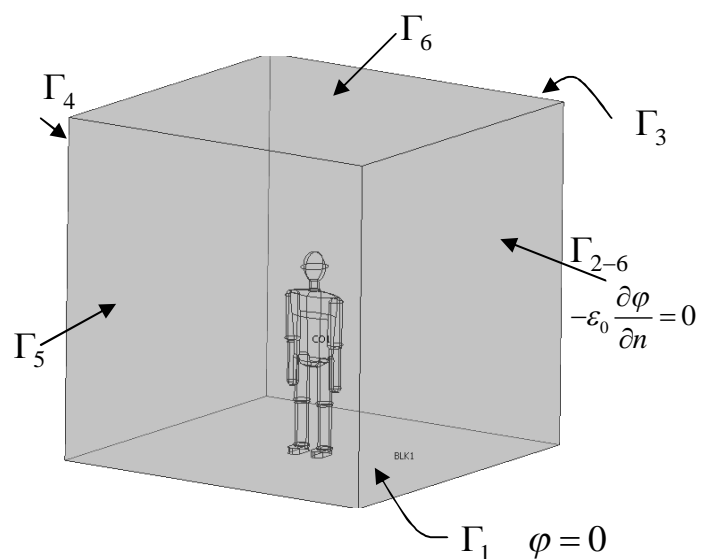


Рис. 2

нат, так и времени, что учитывается в разработанной расчетной модели. Однако в проведенных на данном этапе исследованиях полагалось  $\sigma_s = \text{const}$ .

3. В качестве расчетной области рассматривалась внешняя по отношению к человеку область воздушной среды, а на поверхности человека задавалось граничное условие для нормальной составляющей напряженности электрического поля.

Распределение неизменного во времени электростатического поля вблизи человека описывается следующим дифференциальным уравнением для скалярного электрического потенциала  $\varphi$  [2]:

$$\text{div}(-\varepsilon_0 \text{grad} \varphi) = 0, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – постоянная диэлектрическая проницаемость вакуума. В качестве граничного условия на поверхности человека  $S$  задавалась нормальная составляющая напряженности электрического поля

$$-\varepsilon_0 \left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_S = \sigma_s. \quad (2)$$

Для замыкания расчетной области модель человека помещалась в куб с размером ребра 4 м, причем нижняя его грань полагалась заземленной –  $\varphi|_{\Gamma_1} = 0$ , а на верхней и боковых гранях куба задавалось условие электрической изоляции, имеющее следующий вид (рис. 2):

$$-\varepsilon_0 \left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{\Gamma_{2-6}} = 0.$$

Учитывая сложную криволинейную форму поверхности тела человека в защитной одежде, решение полевой задачи (1), (2) может быть выполнено одним из известных в настоящее время численных методов [3,8]. В данной работе в силу вышесказанного для численного решения этой задачи использовался метод конечных элементов, реализованный в пакете программ COMSOL [12].

**Анализ результатов численного расчета.** На рис. 3 показано полученное расчетным путем распределение электрического потенциала  $\varphi$  (в оттенках серого) и вектора напряженности электрического поля  $\mathbf{E} = -\text{grad}(\varphi)$  (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>. На рис. 4 показано распределение потенциала по поверхности одежды при этом же поверхностном заряде.

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 ос-

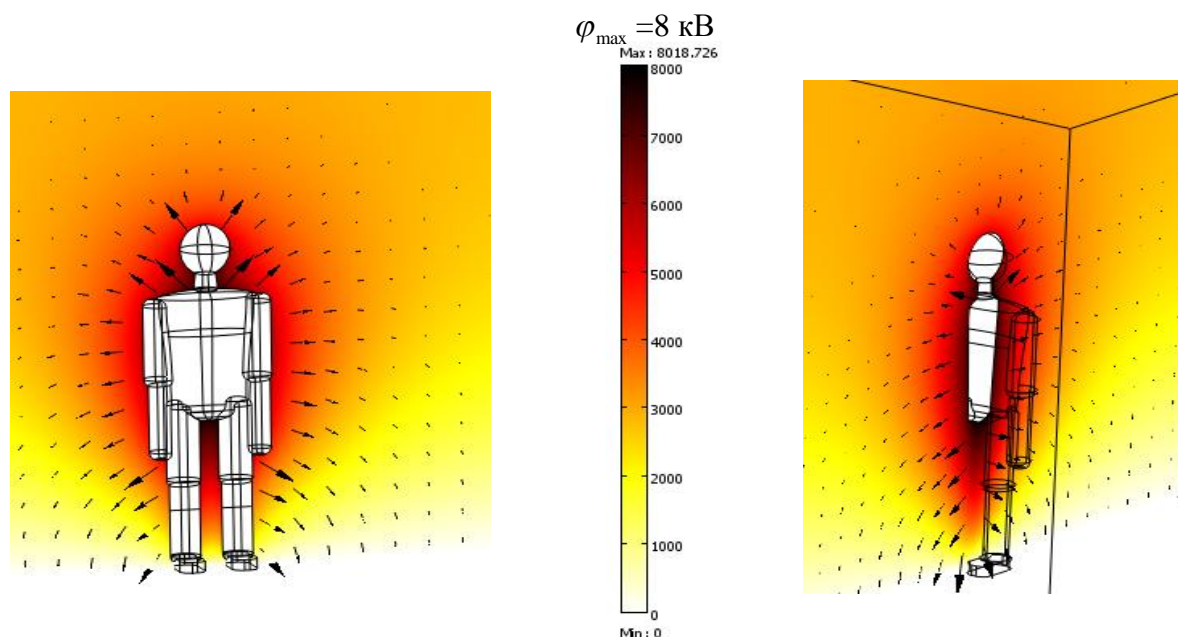


Рис. 3

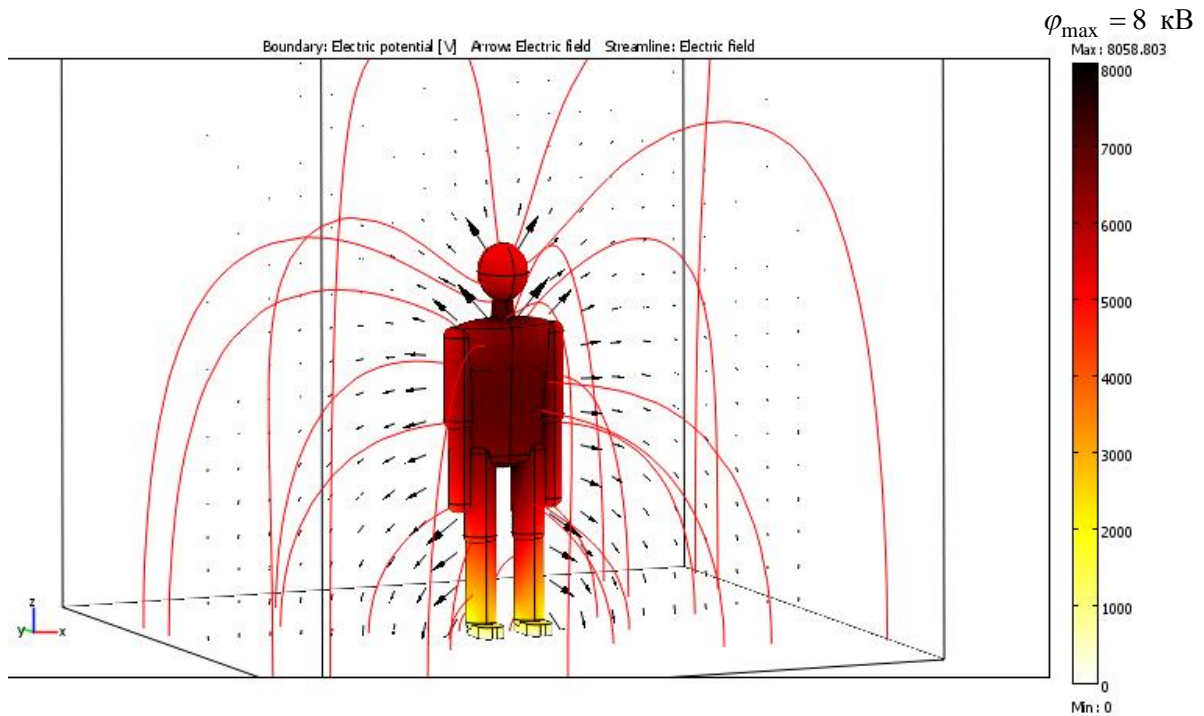


Рис. 4

нованию, на котором стоит человек.

На рис. 5 показано распределение напряженности электрического поля  $|\mathbf{E}|$  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, равное  $E_n = \sigma_s / \varepsilon_0 = 1,1 \cdot 10^4$  В/м = 0,011 кВ/мм. Результаты расчета на рис. 5 подтверждают это.

Видно также, что по мере удаления от поверхности одежды напряженность поля резко снижа-

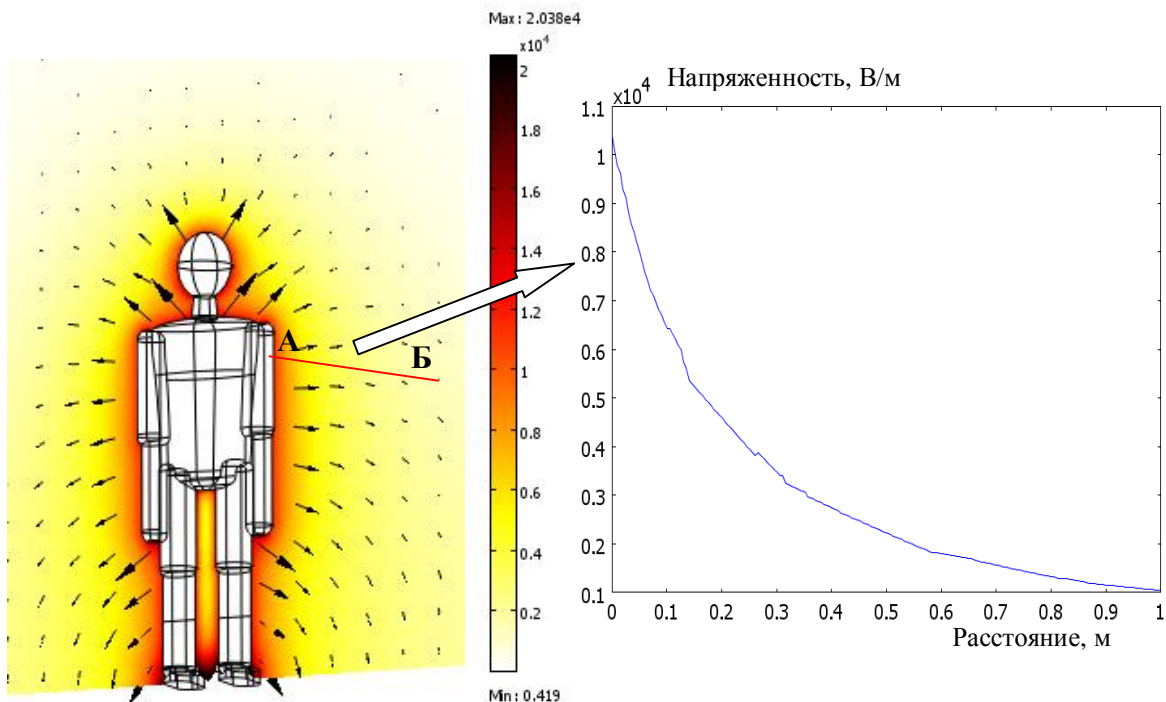


Рис. 5

ется. Так, уменьшение напряженности поля в два раза при удалении от поверхности одежды достигается на расстоянии около 20 см (см. вставку на рис. 5). 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, согласно [7], 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  $|\mathbf{E}|^2 \varepsilon_0 / 2$  вблизи человека приведены на рис. 6 и показывают, что наибольшая доля электрической энергии локализована в воздухе вблизи от человека в приповерхностном слое толщиной около 10 см (см. вставку на рис. 6).

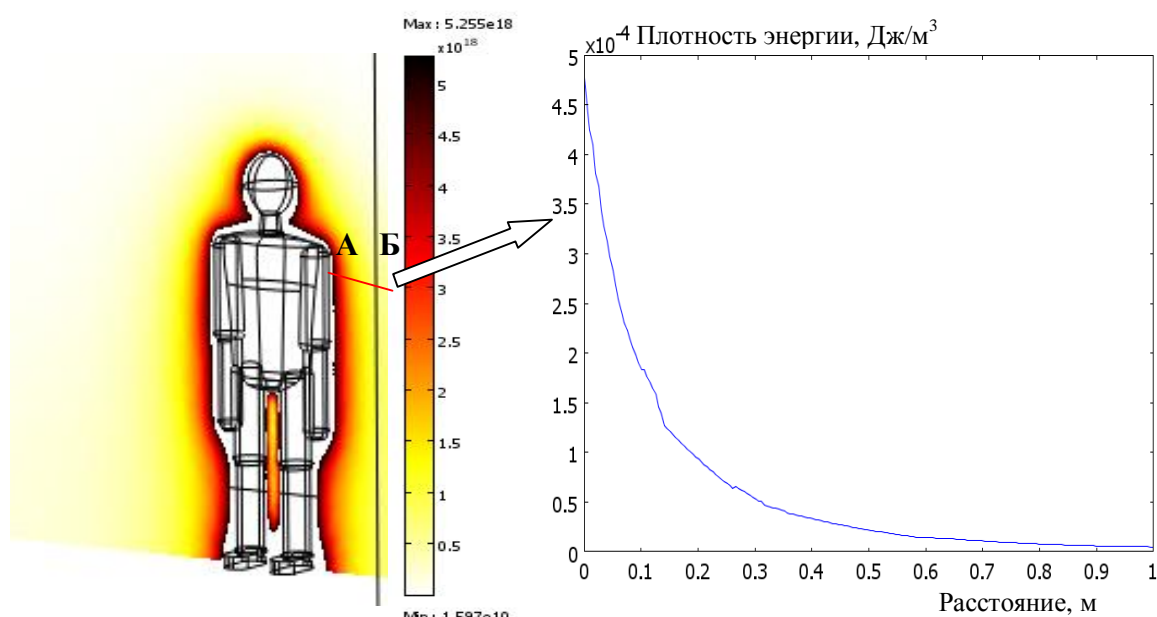


Рис. 6

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 [1,6], что электростатический разряд может воспламенить горючую смесь только в случае, если его энергия больше минимальной энергии зажигания данной смеси. Отсюда условие безопасности может быть записано как

$$W_{иск} \leq W_{мин} / K, \quad (3)$$

где  $W_{иск}$  – энергия разряда статического электричества с заряженной одежды,  $W_{мин}$  – минимальная энергия зажигания горючей смеси (таблицы значений для различных смесей приведены в [6]),  $K$  – коэффициент безопасности – обычно принимается  $K = 2,5$ .

Для расчета энергии разряда  $W_{иск}$  в данной работе используются результаты расчета электростатического поля. Известно [2], что электрическая энергия, запасенная в объеме  $V$  с полем  $\mathbf{E} = (E_x, E_y, E_z)$  определяется с помощью следующего интегрального выражения

$$W_e = 0.5 \varepsilon_0 \int_V (E_x^2 + E_y^2 + E_z^2) dV. \quad (4)$$

В данной работе после нахождения распределения электрического потенциала  $\varphi$  определялась напряженность электрического поля  $\mathbf{E} = -grad\varphi$ , а затем выполнялся численный расчет интеграла в выражении (3). По результатам численного интегрирования получено  $W_e = 0,96$  мДж. Полагая  $W_e = W_{иск}$ , из выражения (3) получим  $W_{мин} \approx 2,5$  мДж. Для примера, согласно [6], минимальная энергия зажигания ацетона при 25<sup>0</sup>С составляет 0,406 мДж, а аэрозоля серы – 15 мДж. Отсюда получен-

ное выше значение энергии, накопленной в электрическом поле человека для исследуемого случая, будет достаточно для воспламенения ацетона (при условии возникновения искрового разряда).

#### **Выводы.**

В работе рассмотрены математическая модель и методика численного расчета трехмерного электростатического поля вблизи человека в одежде из полимерного материала при наличии на ней поверхностного электрического заряда. Разработанная методика включает такие этапы: построение пространственной модели человека; формирование расчетной области, включающей модельного человека и, в общем случае, окружающие его предметы; построение математической модели для расчета электростатического поля в этой области; численное решение этой модели с помощью метода конечных элементов; визуализация результатов расчета. При реализации метода конечных элементов в работе использовался пакет программ COMSOL.

Проведены расчетные исследования электростатического поля вблизи человека для полученного в ходе эксперимента значения плотности поверхностного заряда на одежде  $\sigma_s = 10^{-7}$  Кл/м<sup>2</sup> и сделаны следующие выводы.

1. Максимальное значение электрического потенциала по отношению к земле достигается в области грудной клетки и шеи человека и составляет около 8 кВ.
2. Максимальная напряженность электрического поля достигается на поверхности одежды и составляет 0,01 кВ/мм при выбранном значении  $\sigma_s$ . Область относительно большого электрического поля локализована в приповерхностном слое одежды толщиной 20 см.
3. Интегральная величина энергии электрического поля, накопленная в приповерхностном воздушном слое человека, составляет около 1 мДж. Этой энергии достаточно, например, для воспламенения ацетона в случае возникновения искрового разряда.

1. *Бобровский С.А.* Защита от статического электричества в нефтяной промышленности. – М.: Недра, 1983. – 224 с.
2. *Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.* Теоретические основы электротехники. Том 3. – С-Петербург, Изд. дом “Питер”, 2004. – 376 с.
3. *Колечицкий Е.С.* Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 168 с.
4. *Лёб Л.* Статическая электризация. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 408 с.
5. *Литвиненко Г.С., Третьякова Л.Д.* Засоби індивідуального захисту: виготовлення та застосування. – К.: Лібра, 2008. – 317 с.
6. *Статическое электричество* в химической промышленности / Под. ред. Б.И.Сажина. – М.: Химия, 1977. – 238 с.
7. *Техника* высоких напряжений / Под ред. М.В.Костенко. – М.: Высшая школа, 1973. – 528 с.
8. *Техника* высоких напряжений. Пер. с нем. / Под ред. И.П.Кужекина. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.
9. *Черунова И.В., Меркулова А.В., Горчаков В.В., Бринк И.Ю.* Основы проектирования антиэлектростатической теплозащитной одежды. – М.: Академия Естествознания, 2007. – 132 с.
10. *ДСТУ EN 1149-1.* Одяг захисний. Електростатичні властивості. Частина 1. Поверхневий опір (метод вимірювання і вимоги). – К.: Держспоживстандарт України, 2005. – 12 с.
11. *Wong Y.W.H., Yuen C.W.M.* Selected applications of nanotechnology in textiles / Autex Research Journal. – March 2006. – V. 6. – No.1.
12. [www.comsol.com](http://www.comsol.com)

Надійшла 04.11.2009