

УДК 677.026.75

Л.Д. ТРЕТЯКОВА, канд. техн. наук; доц. НТУУ «КПІ», м. Київ
О.Д. ПОДОЛЬЦЕВ, д-р техн. наук; проф. Інституту електродинаміки НАНУ,
м. Київ

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ НА СКЛАДНИХ ПОВЕРХНЯХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

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.

In the article the mathematical model and the method of numerical calculation of three-dimensional electrostatic field near-by a man at presence of surface charge on his protective clothing made from polymeric material were considered.

Вступ

Електростатичне поле (ЕСП) – це окремий вид електромагнітного поля, що виникає із сукупності нерухомих зарядів на поверхні під час контакту діелектриків з різними значеннями діелектричних постійних або діелектрика з провідником.

Сучасне виробництво висуває щораз вищі вимоги не тільки до вдосконалення техніки та технологічних процесів, а й передусім підвищує напруженість праці, утворюючи нові чинники, які можуть спричинити неусвідомлену загрозу здоров'ю або навіть життю працівників. Для ефективної організації сучасних систем захисту персоналу на виробництві потрібно відповідно до умов праці, характеристик промислового середовища застосовувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ), які дають змогу зменшити негативний вплив шкідливих факторів. Нині для виробництва ЗІЗ (ізолювального, герметичного одягу, респіраторів, протигазів, засобів для захисту рук, ніг, голови, очей) широко використовують матеріали на основі полімерів – поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид (ПВХ), поліуретан, поліефір та ін. Такі матеріали забезпечують ефективний захист від низки шкідливих чинників [1], але за своїми властивостями є діелектриками і створюють додаткові ризики у вигляді ЕСП на зовнішньому та внутрішньому шарах поверхні захисних засобів. Електричні заряди утворюються на працівниках у процесі контактної електризації, в результаті контакту із зарядженими матеріалами та індукції.

У галузях промислового виробництва, пов'язаних з обробкою діелектричних матеріалів, нафтопереробної, гірничодобувної, хімічної, текстильної, паперової та ін. спостерігають явища електризації тіл – виникає й накопичується вільний електричний заряд. На нафтопереробних підприємствах під час технологічних процесів, що супроводжуються тертям, роздрібненням твердих часток, сипучих матеріалів, переливанням діелектричних рідин (нафтопродуктів, мінеральних масел та ін.) виникає статична електризація. На ізольованих від землі металевих частинах устаткування атомних електричних станцій виникають щодо землі напруги близько десятків кіловольт. У шахтах під час руху гумової стрічки транспортера в пристроях пасової передачі та на роликах через пробуксовування виникають заряди протилежних знаків достатньо великих значень, а різниця потенціалів досягає 45 кВ. Аналогічно відбувається електризація під час змотування (намотування) тканин, паперу, матеріалів з полімерними покриттями, поліетиленової плівки та ін.

Електризація виникає під час зіткнення двох різнорідних речовин через розходження атомних і молекулярних сил на їхніх поверхнях. Водночас відбувається перерозподіл зарядів з утворенням на суміжних поверхнях електричних шарів із протилежними знаками і на межі поділу виникає подвійний електричний шар. Теорію подвійних електричних шарів запропоновано Х. Гельмгольцем, і нині широко використовують під час досліджень ЕСП [2].

Неконтрольований накопичений статичний розряд створює потенційну небезпеку для багатьох галузей промисловості, особливо там, де працюють із легкозаймистими рідинами, газами і де є вибухонебезпечний пил. Це небезпечно також під час виконання операцій з обслуговування електронного устаткування і приладів керування. Електризація матеріалів часто перешкоджає нормальному перебігу технологічних процесів виробництва, а також створює додаткову пожежну небезпеку внаслідок виникнення іскрових розрядів за наявності в приміщеннях, резервуарах і ангарах горючих паро- і газоповітряних сумішей, наприклад, за наявності водню більш як 4 % в повітрі або в атмосфері, збагачених киснем. За великих зарядів і різниці потенціалів, низької вологості повітря може відбутися швидкий іскровий розряд між наелектризованими частинами устаткування або на землю. Енергія такої іскри може виявитися достатньою для запалення займистої або вибухонебезпечної суміші. На виробництві необхідно унеможливити виникнення іскрових розрядів від статичної електрики з енергією, що перевищує 40 % мінімальної енергії іскрового розряду в навколишньому середовищі. Практично за напруги 3 кВ іскрового розряду виникає запалення паро- і газоповітряних вибухонебезпечних сумішей, а за 5 кВ – займистого пилу і волокон. Незважаючи на те, що електростатичний заряд не містить великої кількості енергії, висока різниця потенціалів сприяє утворенню струмів, достатніх і для миттєвого виходу з ладу чутливих електронних компонентів і для внутрішньо молекулярного ушкодження їхніх кристалічних ґраток. Для більшої частини виробів мікроелектроніки статичний розряд у 5–10 кВ є руйнівним.

Найсерйозніша небезпека походить від людського тіла, здатного накопичувати статичні заряди та утворювати великі електростатичні потенціали. Наявність у захисному одязі працівника полімерних або вовняних волокон сприяє утворенню електричних потенціалів на рівні 1–5 кВ. Потріскування та іскріння одягу характеризує статичний розряд більш як 5 кВ. Ізолювальний одяг у комплекті з рукавичками, каскою, респіратором, спеціальним взуттям, що має гумову підошву, є гарними діелектриками, і це сприяє нагромадженню на тілі людини високого, більш як 35 кВ, електростатичного потенціалу. Таким чином, виникають додаткові ризики для працівників, які використовують ЗІЗ з полімерних матеріалів – захисний одяг, респіратори, рукавички, взуття, каски, каптури та ін.

Мета статті – аналіз діелектричних характеристик ЗІЗ, які впливають на можливість виникнення ЕСП, розробка математичної моделі і методики розрахунку параметрів цього поля.

Об'єкт досліджень – фізичні основи статичної електризації твердих тіл. Предмет досліджень – методика оцінки на основі математичного моделювання параметрів ЕСП на поверхні захисного одягу з полімерного матеріалу працівника за відповідних умов праці.

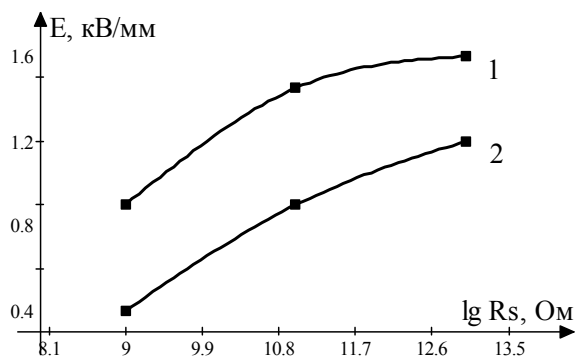
Вплив умов праці на опір полімерного матеріалу

Електростатичні властивості зумовлені будовою полімерів, їхньою фізико-хімічною структурою, хімічним складом поверхневого шару та умовами експлуатації

полімерних виробів. Статична електрика – це поверхнєве явище, тому її виникнення або зникнення залежить від поверхневого опору матеріалу, який електризується. Поверхнєві струми визначають з урахуванням об’ємних, тому вимірюваний поверхнєвий опір (R_s) виявляється залежним і від об’ємного опору (R_v), і від поверхневого струму витоку. Електричний опір характеризує перенесення електричних зарядів в матеріалі під дією зовнішнього електричного поля. Використання електричного опору для оцінки антистатичних властивостей застосовують тому, що нижче R_v або R_s полімеру, то менша величина заряду q і напруженості E утворюється (рис. 1).

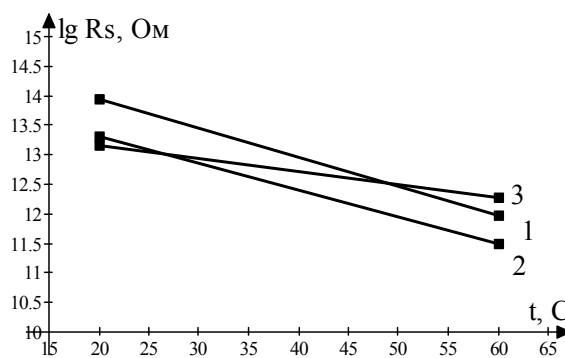
Необхідно зазначити, що швидкості витоку позитивного і від’ємного зарядів відрізняються [3]. Це означає, що величина електричного опору полімеру не завжди достатня для оцінки електростатичних властивостей. Проте в діючих стандартах нормують величину електричного опору для виробів з полімерних матеріалів [4]. Методи вимірювання опорів добре розроблені, не потребують дорогої вимірювальної апаратури і дають змогу отримати за звичайних умов ($t = 20\text{ }^\circ\text{C}$, вологості $W = 60\%$) однозначні результати з невеликою дисперсією. На величину поверхневого опору впливає низка факторів, серед яких найважливіші: температура, вологість, опромінювання, фізико-хімічні властивості матеріалу. Під час зростання температури і невисокої вологості домінантним чинником є об’ємний опір, який зменшується завдяки збільшенню рухливості елементарних ланок, що входять до складу макромолекул і характеризують ступінь полімеризації високомолекулярних з’єднань (рис. 2).

Під час зростання вологості поверхнєвий опір має визначальне значення за рахунок збільшення струмів витоку, що відповідно призводить до його зменшення. Швидкість дифузії води суттєво залежить від хімічної структури полімеру. Молекули води мають невеликі розміри (0,27 нм) і легко проникають у малі пори. За низької вологості електропровідність зростає за експоненціальним законом, за високої (більш як 70 %) – за ступеневою залежністю [5].



1 – під час тертя з хімічною тканиною;
2 – під час тертя з металевим предметом

Рис. 1. Залежність напруженості ЕСП від R_s ПВХ-пластикату



1 – завтовшки 0,15 мм; 2 – завтовшки 0,5 мм;
3 – завтовшки 0,12 мм модифікований

Рис. 2. Залежність поверхневого опору від температури ПВХ-пластикату

Опромінювання полімерів α -, β -, γ - випромінюванням супроводжується зниженням опору. Під дією випромінювання відбувається іонізація матеріалу, ступінь якої обернено пропорційний енергії її частинок. Залежно від знака заряду у виробі під дією електричного поля, що створюється цим зарядом, до його поверхні рухаються іони протилежного знаку. Наприклад, під час впливу γ -випромінювання 100 мкР/год опір поліетилену та полістиролу зменшився в 10^3 разів [3].

Властивості матеріалів залежать від способу виготовлення та композиції сировини зі стабілізаторами, модифікаторами, пластифікаторами, антистатиками, барвниками. Сучасні полімерні матеріали створюють за різними технологіями (терморбондинг, спандбондинг), методами (каландровий, формування), структурними композиціями (одно- і багат шарові, з покриттям, з просоченням), що призводить до суттєвої зміни електростатичних властивостей. Поліпшення антифрикційних властивостей полімерів призводить до зменшення сили тертя і відповідно їх електризації, додавання до композиції ПВХ-пластикату модифікаторів з оксидів рідкоземельних елементів знижує опір з $5,7 \cdot 10^{13}$ до $3,17 \cdot 10^{11}$, з оксидів вольфраму – у чотири рази.

Виходячи з цього, для вивчення дії ЕСП недостатньо використовувати тільки один параметр – опір, необхідно знати головні його характеристики: напруженість, розподіл зарядів і потенціалів, енергію. Особливість ЕСП – це створення умов для протікання електричного струму у вигляді розрядів і достатньо сильна іонізація навколишнього середовища, що зумовлює негативний вплив на самопочуття людини. Поле на поверхні захисного одягу характеризується високим ступенем неоднорідності. Його параметри мають високу ступінь невизначеності: спостерігається нерівномірний розподіл зарядів на ділянках одягу, заряди розподіляються на зовнішній і внутрішній поверхнях різної величини та знаків, відбувається постійне витікання зарядів за рахунок електропровідності, змочування, забруднення. Крім того, суттєво впливають навколишнє середовище, властивості матеріалу, конструкція і геометричні розміри одягу.

Розрахунок тривимірного електростатичного поля поблизу людини

Розрахунок тривимірного ЕСП, утворюваного поблизу людини в захисному одязі під час накопичення на ній поверхневих зарядів, виконано в такій постановці:

1. Створюємо геометричну модель людини об'єднанням різних базових геометричних фігур.

2. Вважаємо, що вся поверхня людини вкрита полімерним матеріалом завтовшки 0,15 мм, що відповідає фактичній товщині використовуваних матеріалів. На поверхні матеріалу внаслідок тертя або індукційного впливу утворився поверхневий заряд зі щільністю $\sigma_s(x, y, z)$. Величина цього заряду загалом є функцією двох змінних: просторових координат і часу, що враховано в розрахунковій моделі. На цьому етапі досліджень вважаємо $\sigma_s = \text{const}$.

3. Розрахункова ділянка – це зовнішня по відношенню до людини ділянка повітряного середовища, гранична умова для нормального складника напруженості ЕСП задана на поверхні людини.

Розподіл незмінного в часі ЕСП поблизу людини описується таким диференціальним рівнянням для скалярного електричного потенціалу [2]:

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

де $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – постійна діелектрична проникність вакууму.

Гранична умова на поверхні має вигляд

$$-\varepsilon_0 \left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_s = \sigma_s. \tag{2}$$

Для замикання розрахункової ділянки модель людини вміщували в куб з розміром ребра 4 м, водночас нижню його грань вважаємо заземленою, а на верхній і бічних гранях куба задаємо умову електричної ізоляції, що має вигляд (див. рис. 3):

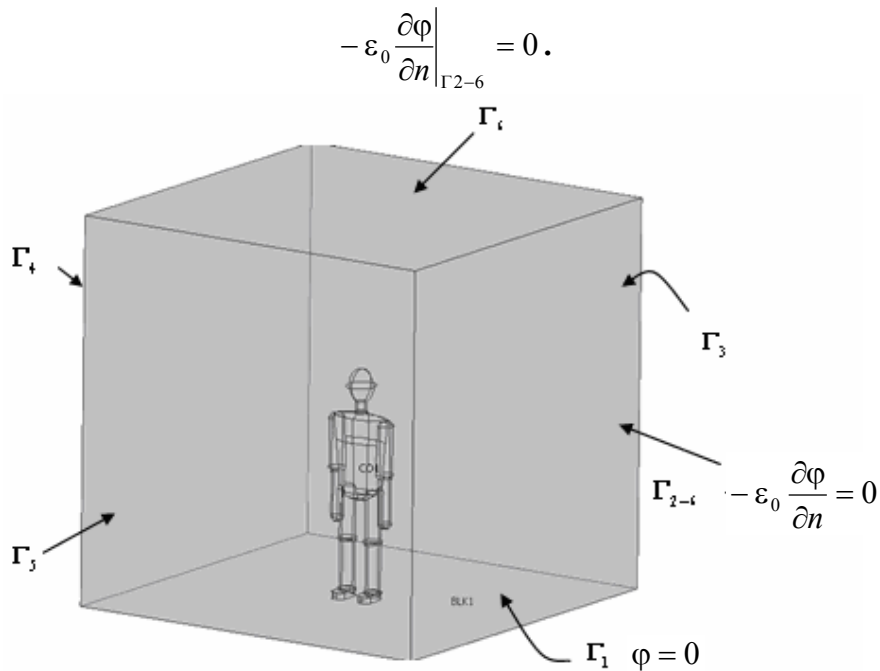


Рис. 3. Розрахункова ділянка для кінцево-елементного аналізу ЕСП поблизу людини з вказівкою граничних умов

Враховуючи складну криволінійну форму поверхні тіла людини в захисному одязі, рішення польової задачі (1), (2) можна виконати одним з відомих нині чисельних методів [6, 7]. У цій праці для чисельного вирішення польового завдання (1), (2) використано метод кінцевих елементів, реалізований у пакеті програм *COMSOL*.

Аналіз результатів чисельного розрахунку

У результаті розрахунків отримано розподіл електричного потенціалу і вектора напруженості ЕСП на поверхні і поблизу людини в ізолювальному одязі для заданої рівномірно розподіленої щільності поверхневого заряду на одязі $\sigma_s = 1 \cdot 10^{-7}$ Кл/м² (рис. 4, 5).

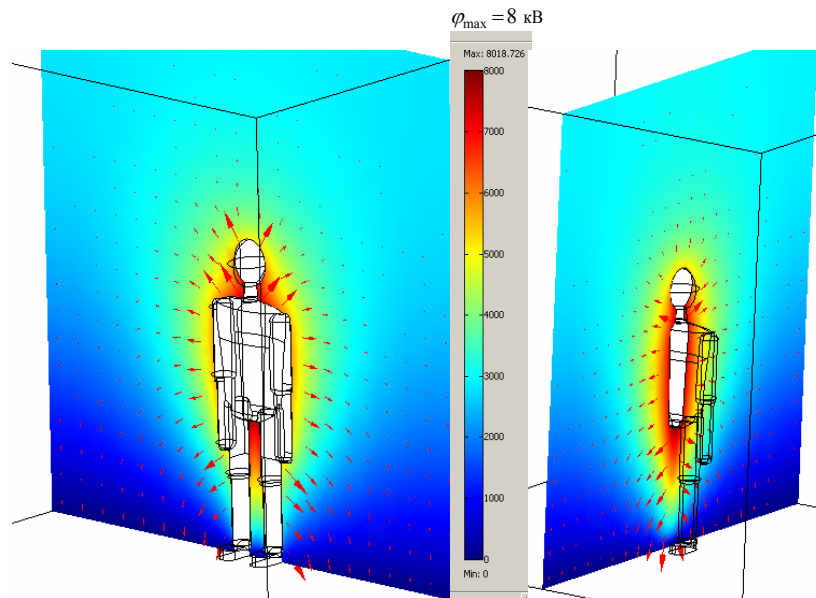


Рис. 4. Розподіл у двох перетинах електричного потенціалу φ і вектора напруженості E (зображено стрілками)

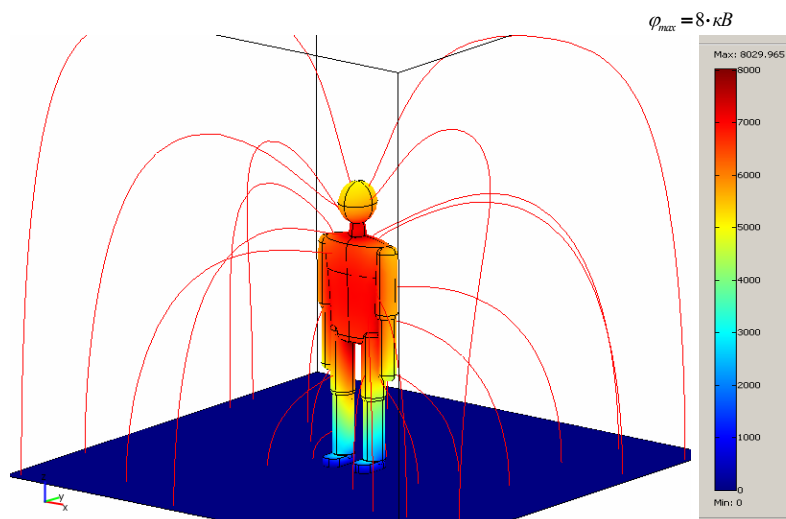


Рис. 5. Розподіл електричного потенціалу ϕ до поверхні одягу та силові лінії вектора напруженості E у навколишньому середовищі

З наведених результатів випливає, що найбільше значення потенціалу досягається в ділянці грудної клітини та шиї людини і становить 8 кВ. Силові лінії електричного поля починаються на поверхні одягу і спрямовані до заземленої площини куба – до поверхні, на якій перебуває людина.

Величина напруженості ЕСП на поверхні одягу має постійне значення через набуте постійне значення σ_s в усіх точках поверхні і дорівнює:

$$E_n = \sigma_s / \epsilon_0 = 1,1 \cdot 10^4 \text{ В/м} = 0,01 \text{ кВ/мм.}$$

Результати розрахунку підтверджують це.

Міру віддалення від поверхні одягу, напруженість поля різко знижується. Так, зменшення у двічі напруженості поля спостерігаємо на відстані близько 20 см від поверхні одягу. Звідси можна вважати, що електричне поле локалізоване в поверхневому шарі завтовшки 20 см.

Зауважимо, що значення напруженості поля на поверхні одягу 0,01 кВ/мм набагато нижче за пробивну напругу повітря в однорідному полі, що становить згідно з [8] 2,3 кВ/мм. Однак під час наближення працівника до заземлених металевих предметів величина напруженості ЕСП в зазорі між одягом і цим предметом суттєво зростатиме і може досягти значення пробою.

Для визначення енергії розряду $W_{\text{іск.}}$ у роботі використано результати розрахунку ЕСП. Відомо [2], що електричну енергію, накопичену в об'ємі V з напруженістю $E = \{E_x, E_y, E_z\}$, визначають за формулою

$$W_e = 0,5 \epsilon_0 \int_V (E_x^2 + E_y^2 + E_z^2) dV. \quad (3)$$

Запропонована методика передбачає після знаходження розподілу електричного потенціалу ϕ і визначення напруженість ЕСП $E = -(\text{grad } \phi)$ чисельний розрахунок інтегралу (3). За результатами чисельного інтегрування отримано $W_e = 0,96$ мДж. Вважаючи, що $W_e = W_{\text{іск.}}$, визначаємо мінімальну енергію W_{min} запалення займистої суміші

$$W_{\text{min}} \geq W_e \cdot K_6,$$

де K_6 – коефіцієнт безпеки, зазвичай приймають рівним 2,5 [9].

У результаті розрахунку отримано $W_{\min} = 2,4$ мДж. Для прикладу, мінімальна енергія запалення ацетону за 25 °С становить 0,406 мДж, аерозолі сірки – 15 мДж [9]. Набутого вище значення енергії, накопиченої в ЕСП людини у досліджуваному випадку, буде достатньо для займання ацетону (за умови виникнення іскрового розряду).

Висновки

1. Метод оцінки ступеня електризації та небезпеки електростатичного поля дає змогу визначити комплекс заходів для спільного безпечного функціонування працівника і технологічного устаткування.

2. Під час визначення придатності захисних засобів, виготовлених з полімерних матеріалів, до електризації та розсіювання зарядів статичної електрики необхідно враховувати не лише опір (об'ємний і поверхневий), а й величину максимально можливого заряду, напруженості та енергії поверхневого електростатичного поля до відповідних умов праці.

3. Запропоновано математичну модель і методику чисельного розрахунку параметрів тривимірного електростатичного поля поблизу людини, одягненої в захисний одяг з полімерного матеріалу за наявності поверхневого електричного заряду.

Список літератури: 1. *Литвиненко Г.Є.* Засоби індивідуального захисту: виготовлення та застосування / Г.Є. Литвиненко, Л.Д. Третьякова. – К.: Лібра, 2008. – 317 с. 2. *Демирчян К.С.* Теоретические основы электротехники. Том 3 / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – С.-Петербург: Изд. дом «Питер», 2004. – 376 с. 3. *Василенюк Ю.И.* Защита полимеров от статического электричества. – Л.: Химия. 1974. – 192 с. 4. ДСТУ EN 114–1. Одяг Захисний. Електростатичні властивості. Частина 1. Поверхневий опір (метод вимірювання і вимоги). – К.: Держспоживстандарт України, 2005. – 12 с. 5. *Gibson N.* Incendivity of discharges from electrostatically charged plastics / N. Gibson, F.C. Liloyd // Brit. J. Appl. Phys. 1965. – Vol.16. – p. 1619-1631. 6. *Колечицкий Е.С.* Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 168 с. 7. Техника высоких напряжений. Пер. с нем. / Под ред. И.П. Кужекина. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с. 8. Техника высоких напряжений / Под ред. М.В. Костенко. – М.: Высшая школа, 1973. – 528 с. 9. Статическое электричество в химической промышленности / Под ред. Б.И. Сажина. – М.: Химия, 1977. – 238 с.

© Третьякова Л.Д., Подольцев О.Д., 2010
Поступила в редколлегию 02.02.10