

*Д. В. Тичков, аспірант, ЧДТУ,  
М. О. Бондаренко, д.т.н., доцент, доц. каф., ЧДТУ,  
Ю. А. Отрош, д.т.н., доцент, нач. каф., НУЦЗУ,  
О. В. Пирогов, к.т.н., доцент, вик. каф., НУЦЗУ*

## **РОЗРАХУНКИ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПРОБОЮ, ЩО ПРИЗВОДИТЬ ДО ВИНИКНЕННЯ ПОЖЕЖЕ- ТА ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНОЇ СИТУАЦІЇ**

(представлено д.т.н. Поздєєвим С. В.)

У статті розглянуті причини виникнення та накопичення електростатичного заряду при контактному терті діелектричних поверхонь. Розраховані критичні значення заряду, що приводить до електричного розряду між цими поверхнями та може привести до виникнення небезпеки вибуху або пожежі в приміщенні, атмосфера якого містить пари або пилоподібні мікрочастинки легкозаймистих речовин. Встановлено, що найбільшу небезпеку виникнення трибоелектричного пробою є речовини з питомим електричним опором від  $1,8 \cdot 10^{14}$  Ом·м до  $1,16 \cdot 10^{16}$  Ом·м (паперовий пи́л, кварцове скло, п'єзоелектрична кераміка, полістирол, слюда, ебоніт та інші). Дано рекомендації щодо усунення/мінімізації таких пожежо- та вибухонебезпечних факторів.

**Ключові слова:** трибоелектричний ефект, електричний розряд, діелектричний матеріал, зарядний струм, час накопичення заряду.

**Постановка проблеми.** Через значну кількість пожеж, що виникають останнім часом на об'єктах цивільного та військового призначення виникає необхідність не лише в проведенні робіт зі своєчасного запобігання та ліквідації наслідків дії вогню, але й вивчення причин виникнення їх місця займання. Серед таких причин, на які мало звертають увагу, проте, які відіграють помітну роль у виникненні пожеже- та вибухонебезпечних ситуацій є електростатичний пробій, що виникає внаслідок накопичення електричного заряду на непровідних поверхнях. Особливо ця проблема стосується об'єктів, атмосфера яких насичена легкозаймистими газами, випаровуваннями або пилоподібними мікрочастинками в місцях накопичення різноманітних діелектричних матеріалів, що знаходяться в тісному контакті між собою (склади паливно-мастильних та лаково-фарбових матеріалів, мукомольні та вугільні млини, хімічні лабораторії тощо). Постійний контакт між діелектриками, відсутність засобів для усунення електричного заряду із зони їх накопичення, незадовільні умови забезпечення мікроклімату на досліджуваному об'єкті, в результаті може призвести до виникнення небезпечного електростатичного пробою, що може спровокувати вибух та пожежу. Тому актуальною проблемою на сьогодні залишається відсутність теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень причин накопичення достатнього електричного заряду, який призводить

до виникнення електростатичного пробою, що, в свою чергу, призводить до утворення пожеже- та вибухонебезпечної ситуації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основні причини та механізми виникнення трибоелектричного ефекту наводяться в дослідженні [1]. В роботі також наводяться рекомендації щодо усунення, чи, принаймні, зменшення накопичувального ефекту трибоелектрики при терті діелектричних матеріалів.

Умови, які ведуть до електричного пробою, а також зовнішні фактори, які зменшують його величину визначені в праці [2]. Серед таких умов, які були зазначені в цій роботі основними вважаються наступні: кліматичні умови (температура та вологість повітря) та фізичні умови (відстань від об'єктами, матеріали, з яких вони виготовлені та інші). В той же час, серед зовнішніх факторів виділялися такі: радіаційний (вплив на поверхню з накопичених зарядом високочастотного електромагнітного випромінювання), електромагнітний (вплив зовнішніх електромагнітних полів) та інші. Таким чином були встановлені основні умови (вологість повітря, діелектрична провідність матеріалів, що контактують) та фактори (опромінення заряду високочастотним електромагнітним випромінюванням), що впливають на виникнення та силу електричного пробою.

В цілому, серед відомих вітчизняних та закордонних вчених, що займалися дослідженню причин виникнення, накопичення електричного трибозаряду та факторів, що ведуть до електричного пробою слід відмітити наступних: Л. М. Кечієва, Є. Д. Пожидаєва, Д. Н. Шапіро, В. І. Кузьмін, Г. Отт, В. Бокслейтер, Т. Масакі, С. Масанорі, та інших [1–5].

Проте, аналіз праць вітчизняних і закордонних авторів виявив, що основна частина робіт присвячена методам та засобам усунення трибоелектричного заряду з поверхні матеріалів, тоді, як питання вивчення механізмів виникнення (тим більше, розрахунків цих зарядів) майже не розглядається. В той же час пропозиції та рекомендації щодо доцільності використання тих або інших діелектричних матеріалів в якості основних елементів конструкцій та/або пакувальної тари в роботах цих авторів не представлені.

**Постановка завдання та його вирішення.** Метою роботи є розрахунки параметрів електростатичного пробою при терті різноманітних діелектричних матеріалів, шляхом дослідження причин його виникнення на мікрорівні, що дозволить більш точно та оперативно встановити діапазони значень пробою, що призводить до виникнення пожеже- та вибухонебезпечної ситуації.

Розглянемо найпростішу схему зарядження плоских ділянок поверхонь внаслідок їх тертя, рис. 1.



Рис. 1. Схема зарядження ділянки плоскої поверхні при її терті по діелектричній поверхні зразка

Нехай значення заряду  $\Delta q$ , що накопичується після кожного кроку тертя визначається умовами контакту і тертя між ділянками зразка та досліджуваної поверхні, а швидкість тертя складає  $n$  кроків за одиницю часу. Це приблизно відповідає зарядному струму:

$$i_c = n \cdot \Delta q. \quad (1)$$

У початковий момент струм заряджає зразок так, що напруга  $U$  збільшується з середньою швидкістю:

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = n \cdot \frac{\Delta q}{C}. \quad (2)$$

При цьому ємність зразка становить  $C = 4\pi \varepsilon_0 \varepsilon r$ .

Збільшення напруги  $\Delta U$  з кожним наступним кроком тертя становить:

$$\Delta U = \frac{\Delta q}{C}. \quad (3)$$

Струм  $i_d$ , що стікає по зразку, визначається опором  $R$  діелектрика і дорівнює:

$$i_d = \frac{U}{R}. \quad (4)$$

Коли значення струму, що стікає зі зразка дорівнюватиме струму заряджання ( $I_C = i_d$ ), настане стаціонарний стан. При цьому електрична напруга досягне свого максимального значення:

$$U_m = R \cdot n \cdot \Delta q. \quad (5)$$

Якщо прийняти найвище напруження до якого можна зарядити зразок при напрузі  $U_{accер}$ , то для опору заземлення повинна виконуватися умова:

$$R \leq \frac{U_{accер}}{n \cdot \Delta q_{max}}. \quad (6)$$

Максимальне значення заряду на певному етапі тертя  $\Delta q_{max}$  може бути оцінене наступним чином:

$$\Delta q_{max} = \varepsilon_0 \cdot E_b \cdot A. \quad (7)$$

Тут  $\varepsilon_0$  – діелектрична проникність повітря, що дорівнює  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $E_b$  – напруженість поля пробою в повітрі між зразком і поверхнею, що становить приблизно  $3 \cdot 10^6$  В/м [6];  $A$  – елементарна площа діелектрика, що контактує зі зразком, дорівнює приблизно  $6,28 \cdot 10^{-16}$  м<sup>2</sup> [7].

Вводячи вказані значення параметрів в (7), знаходимо, що:

$$\Delta q_{\max} = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 6,28 \cdot 10^{-16} = 16,6 \cdot 10^{-21} \text{ Кл.} \quad (7')$$

Припустимо, що швидкість тертя складає 100 кроків в секунду, тоді згідно (1), зарядний струм для максимального значення заряду, взятого (7'), складе:

$$\begin{aligned} i_{c,\max} &= n \cdot \Delta q_{\max}, \\ i_{c,\max} &= 100 \cdot 16,6 \cdot 10^{-21} = 16,6 \cdot 10^{-19} \text{ А.} \end{aligned} \quad (8)$$

При цьому, якщо врахувати, що  $U_{\text{accep}} = 100 \text{ В}$ , то з (6) отримуємо значення опору заземлення  $R \leq 100 \text{ Ом}$ .

Якщо відомий опір діелектрика, наприклад  $10 \cdot 10^{15} \text{ Ом}$ , то це дозволяє визначити за формулою (5) максимальну напругу, до якої може зарядитися зразок під час тертя:

$$U_{\max} = 10 \cdot 10^{15} \cdot 100 \cdot 16,6 \cdot 10^{-21} = 0,0166 \text{ В.}$$

При збільшенні опору діелектрика ця напруга буде зростати. За формулою (3) можна грубо оцінити очікуване збільшення напруги зразка, що відбувається на кожному наступному кроці, прийнявши ємність зразка  $1,29 \cdot 10^{-17} \text{ Ф}$  [7], а значення  $\Delta q$  – з формули (7') отримаємо:

$$\Delta U = 16,6 \cdot 10^{-21} / 1,29 \cdot 10^{-17} = 1,28 \cdot 10^{-3} \text{ В.}$$

Малоймовірним бачиться той факт, що вся область зразка зарядиться до рівня напруги, відповідного пробою, і що при кожному наступному кроці не відбуватиметься часткова нейтралізація утворюваного заряду. Приймаючи з урахуванням сказаного  $\Delta q = 1,245 \cdot 10^{-21} \text{ Кл}$  із середньоквадратичним відхиленням  $0,2 \cdot 10^{-21} \text{ Кл}$ , збільшення напруги для першого кроку буде складати  $96,51 \cdot 10^{-6} \text{ В}$ . При швидкості тертя 100 кроків в секунду, очікувана максимальна напруга буде досягнута за час  $t = 172 \text{ с}$ .

Припустимо, що відстань від зразка до діелектрика становить  $2 \cdot 10^{-9} \text{ м}$  (починають діяти сили близької взаємодії між поверхнями діелектрика) [8]. Це дозволяє обчислити силу, яка виникає між зразком і поверхнею тертя при електростатичному прободі:

$$F = \frac{U_{\max}^2}{4\delta}, \quad (9)$$

$$F = \frac{0,0166^2}{4 \cdot 2 \cdot 10^{-9}} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ Н.}$$

При тому, що критична сила, яка прикладається до зразка складає  $F_{\text{кр}} = 14 \cdot 10^{-8} \text{ Н}$ , сила  $F$ , розрахована відповідно за формулою (9) може стати

навіть причиною руйнування не тільки досліджуваної поверхні, але й зразка.

Деякі випадки взаємодії діелектричного зразка з різними діелектричними матеріалами наведені в табл. 1.

**Табл. 1. Результати розрахунку параметрів електростатичної взаємодії зразка з діелектричними матеріалами**

Матеріал	Питомий електричний опір, Ом·м	Максимальна пробивна напруга, В	Час накопичення пробивного заряду, с	Сила електростатичної взаємодії, Н
Тефлон	$10^{19}$	16,6	17200	344
Скло	$10^{16}$	0,017	172	$3,44 \cdot 10^{-4}$
Каучук	$4 \cdot 10^{13}$	$6,64 \cdot 10^{-5}$	0,688	$5,51 \cdot 10^{-9}$
Поліетилен	$10^{12}$	$1,66 \cdot 10^{-6}$	0,017	$3,4 \cdot 10^{-12}$
Кераміка	$10^{11}$	$1,66 \cdot 10^{-7}$	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$3,44 \cdot 10^{-14}$
Кремній	$10^6$	$1,66 \cdot 10^{-12}$	$1,72 \cdot 10^{-8}$	$3,44 \cdot 10^{-24}$

З табл. 1 видно, що в більшості випадків, при терті діелектричних поверхонь сила електростатичної взаємодії значно менша, наприклад, за сили Ван-дер-Ваальсових взаємодій між поверхнями при їх контакті (в середньому, сили Ван-дер-Ваальсових взаємодій між двома діелектриками становлять порядку  $13 \cdot 10^{-15}$  Н) [9]. При цьому, небезпека руйнівного електростатичного пробою зведена до мінімуму. Це відбувається або через низький опір діелектрика і тому заряд стікає, не досягнувши руйнівного значення, або час накопичення заряду настільки великий, що перевищує час одного циклу тертя, тому заряд «стікає» через вологу адсорбовану на поверхні об'єкту тертя діелектрика.

Оцінимо діапазони напруги та питомого електричного опору, при яких відбувається виникнення небезпечного електричного пробою.

Згідно з умовою досягнення критичної сили  $F_{cr} = 14 \cdot 10^{-8}$  Н [10], отримаємо:

$$U_{cr1} = \sqrt{\frac{F_{cr} \cdot 4\delta}{r}} = \sqrt{\frac{14 \cdot 10^{-8} \cdot 4 \cdot 2 \cdot 10^{-9}}{10 \cdot 10^{-9}}} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ В.}$$

Звідки отримуємо значення критичного питомого електричного опору:

$$R_{cr1} = \frac{U_{cr1}}{n \cdot \Delta q};$$

$$R_{cr1} = \frac{3 \cdot 10^{-4}}{100 \cdot 16,6 \cdot 10^{-21}} = 1,8 \cdot 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

За умови досягнення критичного часу  $t = 100$  с – час одного дослідного циклу тертя:

$$t_{cr} = \frac{U_{cr2}}{\Delta U}, \text{ звідки } U_{cr2} = t_{cr} \cdot \Delta U = 200 \cdot 9,651 \cdot 10^{-5} = 1,93 \cdot 10^{-2} \text{ В.}$$

Значення критичного питомого електричного опору:

$$R_{cr2} = \frac{U_{cr2}}{n \cdot \Delta q_{\max}},$$
$$R_{cr2} = \frac{1,93 \cdot 10^{-2}}{100 \cdot 16,6 \cdot 10^{-21}} = 1,16 \cdot 10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{ м.}$$

**Висновки.** В роботі вивченні механізми накопичення трибоелектрики в зоні контактного тертя діелектричних поверхонь, яке проводилося шляхом розрахунку сил електростатичного взаємодії та визначення критичних діапазонів пробійної напруги між цими поверхнями.

Проведені розрахунки показали, що для більшості діелектриків електростатичний пробій не виникає в процесі їх тертя. Це пов'язано з недостатнім часом накопичення пробійного заряду і його "стіканням" по шару вологи адсорбованої на поверхні діелектрика. При цьому матеріалами, тертя між якими викликає небезпеку накопичення пробійного електростатичного заряду при проведенні дослідження будуть матеріали з питомим електричним опором від  $1,8 \cdot 10^{14}$  Ом·м до  $1,16 \cdot 10^{16}$  Ом·м. Цим значенням відповідають матеріали: паперовий пил, кварцове скло, п'єзокераміка, полістирол, слюда, ебоніт тощо. Тобто можна рекомендувати: в приміщеннях з підвищеним рівнем пожеже- та вибухонебезпеки уникати значного накопичення таких матеріалів та умов, що можуть призвести до їх тертя (наприклад, вібрацій), і, як наслідок, виникнення небезпечного електричного пробію.

Подальші дослідження, які проводитимуться нами в цьому напрямку присвячені розрахунково-експериментальному підтвердженню методів та засобів усунення/мінімізації таких пожеже- та вибухонебезпечних факторів [11, 12].

## ЛІТЕРАТУРА

1. Л. Н. Кечиев, Е. Д. Пожидаев. Защита электрических средств от воздействия статического электричества. Москва. 2005. 352 с.
2. Шапиро Д. Н. Электромагнитное экранирование. Научное издание. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект». 2010. 120 с.
3. Кечиев Л. Н., Кузьмин В. И. Электростатический разряд и электронное оборудование. Москва: МИЭМ. 1996. 84 с.
4. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных схемах. Москва: Мир. 1979. 270 с.
5. Masaki T., Masanori S., Itsuya N., Kenji A. An Advanced ESD Test Method For Charged Device Model. Electrostatic Overstress / Electrostatic Discharge Symposium Proceedings. 1992. p. 2. 5.1 2.5.12.
6. Husain, E.; Nema, R. S. "Analysis of Paschen Curves for air, N2 and SF6 Using the Townsend Breakdown Equation," Electrical Insulation, IEEE Transactions on , vol.EI-17, no.4, P.350-353.

7. М. О. Бондаренко, С. О. Білокін, В. С. Антонюк, Ю. Ю. Бондаренко. Механізм виникнення та нейтралізація залишкової трибоелектрики при скануванні кремнієвим зондом атомно-силового мікроскопу діелектричних поверхонь. Журнал нано- та електронної фізики. Суми: СумДУ. 2014. Том 6. № 2. С.02018-1 02018-5.

8. W. Saslow Electricity, Magnetism, and Light. UK, London, Academic Press. 2002. 800 p.

9. С. А. Білоконь, М. А. Бондаренко, В. А. Андриенко, Ю. Ю. Бондаренко, И. В. Яценко. Минимизация влияния капиллярных сил при исследовании поверхностей изделий наноэлектроники в контактном режиме атомно-силового микроскопа. Минск: Беларуская навука. 2014. С. 164–168.

10. Tommasini D. Dielectric insulation and high-voltage issues. CERN-2010-004. P. 335–355.

11. Отрош Ю.А. Використання системи моніторингу для оцінки технічного стану будівельних конструкцій. Промислове будівництво та інженерні споруди. Київ, 2018. Вип. 3. С. 1–7.

12. Отрош Ю. А. Розробка підходу до визначення технічного стану будівельних конструкцій при дії силових та високотемпературних впливів. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2018. № 71. С. 54–60.

Д. В. Тычков, М. А. Бондаренко, Ю. А. Отрош, А. В. Пирогов

**Расчеты и исследования причин электростатического пробоя, что приводят к возникновению пожаро- и взрывоопасной ситуации**

В статье рассмотрены причины возникновения и накопления электростатического заряда при контактном трении диэлектрических поверхностей. Рассчитаны критические значения заряда, приводящего к электрическому разряду между этими поверхностями, что может привести к возникновению опасности взрыва или пожара в помещении, атмосфера которого содержит пары или пылеобразные микрочастицы легковоспламеняемых веществ. Установлено, что наибольшую опасность возникновения трибоэлектрического пробоя есть вещества с удельным электрическим сопротивлением от  $1,8 \cdot 10^{14}$  Ом·м до  $1,16 \cdot 10^{16}$  Ом·м (бумажная пыль, кварцевое стекло, пьезоэлектрическая керамика, полистирол, слюда, эбонит и прочие). Даны рекомендации по устранению / минимизации таких пожаро- и взрывоопасных факторов.

**Ключевые слова:** трибоэлектрический эффект, электрический разряд, диэлектрический материал, зарядный ток, время накопления заряда.

D. Tychkov, M. Bondarenko, Yu. Otrosh, O. Pirogov

**Calculations and studies of the causes of electrostatic breakdown, which lead to a fire and explosive situation**

The article discusses the reasons for the occurrence and accumulation of electrostatic charge during contact friction of dielectric surfaces. Critical values of the charge leading to an electric discharge between these surfaces have been calculated, which can lead to a risk of explosion or fire in a room, the atmosphere of which contains vapors or dusty microparticles of flammable substances. It was found that the greatest danger of triboelectric breakdown is substances with a specific electrical resistance from  $1.8 \cdot 10^{14}$  Ohm·m to  $1.16 \cdot 10^{16}$  Ohm·m (paper dust, quartz glass, piezoelectric ceramics, polystyrene, mica, ebonite, etc). Others recommendations are given on elimination / minimization of such fire and explosive factors.

**Keywords:** triboelectric effect, electric discharge, dielectric material, charging current, charge accumulation time.