УДК 517.523.9 DOI: https://doi.org/10.15407/techned2026.04.003

# БАГАТОГОЛЬЧАСТА ЕЛЕКТРОДНА СИСТЕМА З МЕТАЛЕВИМ ДИСКОМ, ЩО ПРИЗНАЧЕНА ДЛЯ ВИРОБЛЕННЯ ОЗОНУ У СТРИМЕРНОМУ КОРОННОМУ РОЗРЯДІ

**В.О. Берека**[*] докт. філософії, **І.В. Божко**[**] канд. техн. наук, **Ю.М. Васецький**[***] докт. техн. наук, **І.П. Кондратенко**[****], чл.-кор. НАН України
**Інститут електродинаміки НАН України,**
**пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.**
**E-mail: yuriy.vasetsky@gmail.com.**

*Пошук методів врахування значної кількості факторів, що впливають на розвиток позитивного коронного розряду у технологічних процесах, визначає актуальність дослідження у цьому напрямку. Метою роботи є визначення у стримерному коронному розряді в повітрі атмосферного тиску впливу геометричної конфігурації багатогольчатої електродної системи з металевим диском, а також розходу повітря з його подачею вздовж вістря на розподіл електричного поля, виконання умови лавинно-стримерного переходу, вихід озону та необхідні для цього енерговитрати. Показано існування порогових значень міжелектродної напруги, довжини вістря та відстані між вістрями, які обмежують можливість появи стримерів у коронному розряді. На основі експериментальних результатів стосовно споживання енергії зроблено висновок про можливість існування оптимальних значені довжини голок та відстані між ними. Виявлено, що збільшення витрат повітря в електродній системі під час вироблені озону призводить до зменшення питомих витрат енергії та одночасно до зменшення концентрації озону. Такий зв'язок в залежності від призначення стримерного коронного розряду необхідно враховувати під час його практичного застосуванні.* Библ. 7, рис. 4, табл. 2.
***Ключові слова:*** позитивна стримерна корона, багатогольчаста електродна система, вихід озону, енерговитрати. оптимізація електродної системи.

**Вступ.** У нинішній час застосування коронного електричного розряду в газі, що має місце у різко неоднорідному електричному полі, наприклад, біля вістря, не втрачає свого значення. Привабливість такого типу електричного розряду полягає в ефективності створення електрично заряджених та хімічно активних частинок, що здійснюється електронами та фотонами, які виникають в коронному розряді. У разі застосуванні позитивного стримерного коронного розряду напруженість електричного поля біля головці стримера, що розповсюджується до катоду з великою швидкістю, досягає значної величини [1]. У такому полі відбуваються електрофізичні процеси з інтенсивного генерування озону, активних радикалів та інших частинок. Крім того, стримерний розряд може з'являтися у певних режимах роботи високовольтних пристроїв різного призначення [2]. Тому його вивчення, поряд з дослідженням інших видів коронного розряду [3–5], є актуальною задачею.

В експериментах і практичних застосуваннях коронного розряду з вістрями, що коронують, має розповсюдження електродна система з металевим диском, паралельним іншому звичайно заземленому електроду. Металевий диск є платформою для багатогольчастого електрода і також він обмежує довжину вістря. Диск суттєвим чином впливає на розподіл електричного поля, зменшуючи напруженість поля біля вістря і одночасно збільшуючи його значення в інший частині міжелектродного простору. Звідси випливає актуальність дослідження впливу наявності металевого диску, довжини голок та їх взаємне розташування на параметри стримерного коронного розряду і в кінцевому рахунку на ефективність коронного розряду в технологічних застосуваннях.

**Метою** роботи є визначення у стримерному коронному розряді в повітрі атмосферного тиску впливу геометричних параметрів багатогольчатої електродної системи з металевим диском і витрат

© Берека В.О., Божко І.В., Васецький Ю.М., Кондратенко І.П., 2026
ORCID: [*] https://orcid.org/0000-0003-0888-2864; [**] https://orcid.org/0000-0002-7955-246X;
[***] https://orcid.org/0000-0002-4738-9872; [****] https://orcid.org/0000-0003-1914-1383
© Видавець ВД «Академперіодика», НАН України, 2026
Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk

повітря з його подачею вздовж вістря на розподіл електричного поля, виконання умови лавинно-стримерного переходу, кількісні характеристики виходу озону та необхідні для цього енерговитрати.

**Геометричні параметри електродної системи і математична модель**. Металевий диск і вістря знаходяться під однаковим позитивним потенціалом $\varphi = U$ навпроти заземленого плоского електроду. Геометричні параметри основних елементів показано на рис. 1: $d = 15$мм – міжелектродна відстань є незмінною, $h$ – довжина вістря, $a$ – крок між вістрями, $r_c = 0{,}05$ мм – радіус циліндричного вістря, який має заокруглення верхівки того ж радіусу (у розрахунковій частині)

У розрахунках застосована спрощена математична модель, в якій розглядається зростання і дрейф лавин електронів без врахування електричного поля розподіленого об'ємного заряду іонів. Такий підхід часто застосовується у дослідженні процесів з відокремленими лавинами і стримерами [1] та дає змогу зосередитися на виявленні впливу основних факторів, що впливають на параметри коронного розряду.

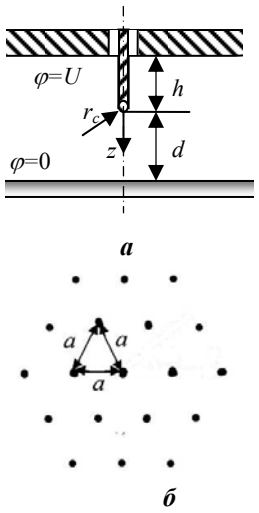


**Рис. 1**

Збільшення кількості електронів в лавині $N_e$ до виникнення стримерів обчислювалося з урахуванням ефективного коефіцієнту ударної іонізації $\alpha_{ef}$. Залежність коефіцієнту $\alpha_{ef}$ від напруженості електричного поля $E$ визначалася за допомогою розповсюдженої апроксимації, що містить параметри $A$ і $B$, величини яких наведені в [1, 6, 7]

$$N_e(\xi) = \exp\left( \int_{\xi_0}^{\xi} \alpha_{ef}(\xi')d\xi' \right), \text{ де } \frac{\alpha_{ef}}{p} = A\exp\left(-\frac{B}{E/p}\right). \qquad (1)$$

Тут $p$ – тиск повітря; $\xi$ – координата, вздовж якої переміщується лавина електронів (зазвичай – це силова лінія поля); $\xi_0$ – положення початкового електрона. Задля іонізації молекул повітря напруженість поля повинна перевищувати поріг $\approx 26\cdot 10^5$ В/м.

Лавинно-стримерний перехід для повітря атмосферного тиску визначався за умови досягнення визначеної кількості електронів у лавині [1, 6]

$$Q = \ln(N_e) = 20. \qquad (2)$$

**Розрахунок зростання лавин електронів і виконання умови лавинно-стримерного переходу.** *У випадку електродної системи з одним вістрям* за обраних значеннях $d$ і $r_c$ параметрами, що впливають на електророзрядні процеси, є довжина вістря $h$ і напруга $U$. У різко неоднорідному полі тонкого вістря початок іонізації молекул, де напруженість поля починає перевищувати поріг іонізацій, можливий поблизу вістря. Лавина електронів, збільшуючись, дрейфує в напрямку вістря і на певній відстані від нього можливо виконання умови лавинно-стримерного переходу (2). Для різних довжин вістря $h$ за напрузі $U = 17$ кВ відповідні значення відстаней порогу іонізації $z_i$ і появи стримерів $z_Q$ на осі симетрії $z$, а також напруженість поля $E_Q$ в точках перетворення лавини у стример надані у табл. 1.

**Таблиця 1**

| $h$, м | $z_i$, м | $z_Q$, м | $E_Q$, В/м |
|---|---|---|---|
| $5\cdot10^{-3}$ | $3.9\cdot10^{-4}$ | $3.0\cdot10^{-5}$ | $290\cdot10^5$ |
| $7\cdot10^{-3}$ | $4.5\cdot10^{-4}$ | $4.5\cdot10^{-5}$ | $260\cdot10^5$ |
| $10\cdot10^{-3}$ | $5.2\cdot10^{-4}$ | $6.6\cdot10^{-5}$ | $230\cdot10^5$ |

З таблиці видно, що у разі збільшенні довжини вістря збільшується відстань, на якій можлива іонізація молекул. Це означає, що при цьому збільшується і область біля вістря, поява початкових електронів в якому призводить до зростання лавин та їх перетворення у стримери. Довжина вістря, за якій виконується умова лавинно-стримерного переходу (2), має пороговий характер. Це пояснюється тим, що у разі зменшенні відстані $z_i$ кількість електронів в лавині на максимальному шляху її зростання не може досягти необхідних значень за умови (2). Так, для напруги $U = 17$ кВ поява стримерів неможлива за довжині вістря $h < 3$ мм. Для кожної довжини вістря існує порогове значення напруги між електродами, коли можливий лавинно-стримерний перехід. У разі збільшенні довжини вістря порогове значення напруги зменшується. Наприклад, для $h = 7$ мм порогове значення, що розраховане за математичною моделлю, складає вже тільки $U \approx 9$ кВ, а за $h = 10$ мм така напруга є $U \approx 7$ кВ.

*У випадку багатогольчатого електрода* ще одним геометричним параметром, який впливає на розвиток електророзрядного процесу, є відстань (крок) $a$ між сусідніми вістрями. Для напруги $U = 17$ кВ залежності параметра $Q$ від відстані $a$ показано на рис. 2. За довжині вістря $h = 5, 7, 9, 15$ мм відповідні криві позначено послідовно номерами *1*, *2*, *3*, *4*. З рисунку видно, що задля виконання умови $Q \geq 20$, тобто для збудження стримерного розряду у проміжку, крок між вістрями повинен перевищувати мінімальну величину $a_{\min} = 5$ мм. При цьому довжина вістря в діапазоні $h = 5...12$ мм слабко впливає на значення $a_{\min}$.

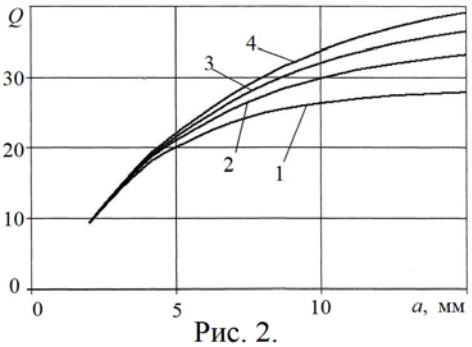


Рис. 2.

Враховуючи результати розрахунків задля експериментального вивчення ефективності стримерного коронного розряда із застосуванням багатогольчатого електрода, обрано аноди, у яких як довжина вістря, так відстань між ними перевищували 5 мм.

**Експериментальні дослідження**. На відміну від розрахунків, вістрями в експериментах слугували платинородієві смужки з поперечним перерізом $0.06 \times 0.3$ мм. Диск мав отвори для індивідуального обдування вістрів, що коронують (показані на рис. 1 у вигляді незаштрихованих областей біля поверхні вістря). Постійна напруга позитивної полярності подавалася на електроди від стабілізованого високовольтного джерела живлення. Сигнали для запису струмів і напруг знімалися, відповідно, з малоіндуктивного шунта та омічного подільника напруги і подавалися на вхід електронних пристроїв, характеристики яких дають змогу зафіксувати особливості електророзрядних процесів. Вимірювання концентрації озону $C$ здійснювалося оптично по поглинанню ультрафіолетового (УФ) випромінювання в газовій кюветі, до якої випромінювання надходило з електродної системи. Величина концентрації $C$ визначалася, виходячи з закону Бугера-Ламберта-Бера $R = R_0 \exp(-mG_\lambda C)$, де $R_0, R$ – величини сигналів на виході фотоелектронного помножувача за відсутності і наявності озону в кюветі відповідно, $m$ – оптична довжина кювети, $G_\lambda$ – переріз поглинання озоном випромінювання на довжині хвилі $\lambda$. Вимірювання проводилися на довжинах хвиль 254,7 та 275,1 нм.

*Одноголчастий електрод*. Показники коронного розряду з одиночним вістрям дають змогу здійснювати їх порівняння з відповідними показниками багатогольчастого електрода. Приклад відповідних характеристик за $h$ = 9 мм, $d$ = 15 мм та витраті повітря $V$ = 5 л/хв наведено на рис. 3. З вольтамперної характеристики (ВАХ) розряду (крива *1*) видно, що напруга початку коронування становить 7 кВ. Усереднений за часом струм коронного розряду $I$ в експерименті досягає найбільшого значення $I_m$ = 180 мкА за максимальній величині напруги, що подається, $U$ = 17 кВ. За величині струму $I$, близької до 40 мкА, на ВАХ спостерігається перегин, після якого зі зростанням напруги $U$ крутість наростання струму збільшується. Струму в точці перегину кривої відповідає поява вимірюваної величини концентрації озону $C$, крива *2*. З подальшим збільшенням розрядного струму концентрація $C$ безперервно підвищується, а питомі енерговитрати на генерацію озону $W$ знижуються (крива *3*), які за $I = I_m$ досягають значень відповідно 0.35 мг/л та 30 кВт·год/кг.

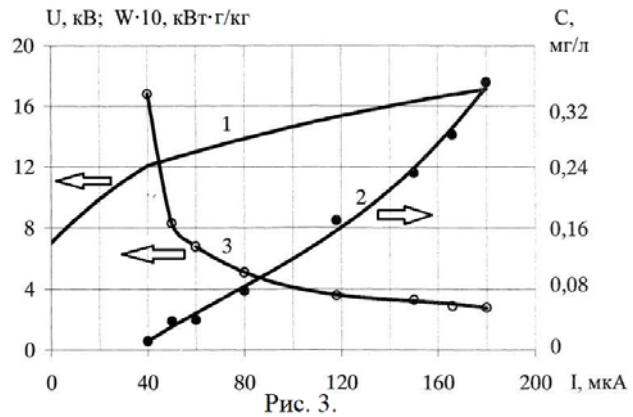


Рис. 3.

Осцилографування розрядного струму показує, що в області перегину ВАХ з'являються короткі імпульси струму стримерів (200 ... 300 нс) з амплітудами $i_m \sim 10$ мА. Зі збільшенням усередненого розрядного струму до $I$ = 180 мкА амплітуди імпульсів $i_m$ досягають значень 70 мА.

Дослідження показали, що показники розряду значно залежать від витрати газу. Збільшення витрати газу за постійній потужності, що вкладається, призводить до зниження концентрації озону і питомих витрат енергії. Так, наприклад, за витратах повітря $V$ в діапазоні 0,2...27 л/хв величини $C$ і $W$

змінюються відповідно в межах 2,5...0,1 мг/л та 70...20 кВт·год/кг. Збільшення концентрації озону до максимальних значень 2,5 мг/л призводить до зниження амплітуди струму стримерів до 20 мА. Це вказує на суттєвий вплив негативних іонів озону $O_3^-$ з великою енергією спорідненості до електрона (2,1 еВ [1]), що пов'язане зі зменшенням концентрації електронів, які в першу чергу забезпечують електропровідність плазми каналів стримерів.

Наявність у складі електродної системи плоского диска сприяє збільшенню виходу озону зі зниженням питомої витрати електроенергії. Наприклад, за довжині вістря $h$ = 9 мм питомі енерговитрати знижуються більш ніж удвічі порівняно з відсутністю такого диска. Це видно з таблиці 2, в якій наведено результати, отримані в однакових умовах за відсутності та наявності металевого диска, рядки 1 і 2. Збільшення енерговитрат за відсутності металевого диску може бути пов'язано з великою часткою струму лавин електронів уздовж бічної поверхні довгого вістря, не обмеженого диском.

*Багатогольчастий електрод*. Експерименти, що проведені за різних довжинах вістря $h$ і відстані між ними $a$, дали змогу встановити оптимальні геометричні розміри за значенням питомих енерговитрат на генерацію озону $W$. Відповідні значення наведено у рядку 3 таблиці 2. Порівняння з одногольчастим електродом у рядку 2 показує, що відстань між вістрями впливає меншою мірою, ніж довжина вістря (принаймні на відстанях між вістрями, що є не меншими за їх довжину).

**Таблиця 2**

| Кількість вістрів | $h$, мм | $a$, мм | $V$, л/хв | $W$, кВт·год/кг |
|---|---|---|---|---|
| 1 | ∞ | - | 7 | 68 |
| 1 | 9 | - | 7 | 30 |
| 14 | 9 | 10 | 7 | 29 |
| 36 | 4 | 7 | 7 | 46 |

Зміна основних геометричних розмірів електродної системи (величин $h$ та $a$) до значень, що виходять за межі оптимальних, призводять до зростання питомих витрат енергії. Це видно з даних у рядку 4 таблиці, в якій за $h$ = 4 мм і $a$ = 7 мм значення $W$ = 46 кВт·год/кг у півтора рази вище, ніж $W$ за оптимальних $h$ у рядку 3.

Характеристики багатогольчастого електрода при оптимальних значеннях геометричних параметрів $h$ = 9 мм $a$ = 10 мм представлені на рис. 4. Крива *1* показує, що концентрація озону зменшується від 2 мг/л за малих витратах повітря $V$ = 1 л/хв до 0.4 мг/л зі збільшенням витрати до 12 л/хв. Максимальне значення концентрації 3 мг/л було отримано за мінімальних витрат $V$ = 0,2 л/хв (на рис. 4 не показано). Питомі енерговитрати $W$ на отримання озону, як й для одиночного вістря, зі збільшенням величини $V$ знижуються (крива *2*). За витрати повітря $V$ = 11 л/хв вони становлять 20 кВт-год/кг. Подальше збільшення $V$ до 25 л/хв призводить до зменшення енерговитрат $W$ до 14 кВт·год/кг. Зазначимо, що ця величина є характерною для бар'єрного розряду у неосушеному, як і в нашому випадку, атмосферному повітрі.

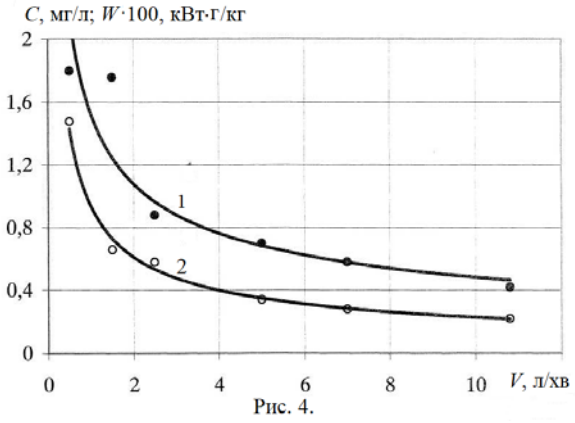


Рис. 4.

**Висновки.** Розрахункові дослідження щодо виконання умови лавинно-стримерного переходу в електродній системі вістря, довжина якого обмежена металевим диском, проти площини показали існування порогових значень довжини вістря і величини постійної міжелектродної напруги, менше яких поява стримерів є неможливою. У багатогольчастого електрода для появи стримерів відстань між найближчими вістрями також повинна перевищувати визначене порогове значення.

Експериментальні дослідження генерації озону в багатогольчастій електродній системі та необхідні для цього енерговитрати показали існування оптимальних за величиною енерговитрат довжини вістря і відстані між ними. Виявилося, що основний вплив має довжина вістря, в той час як для систем з різною відстанню між вістрями, що перевищує певне значення, питомі енерговитрати задля вироблення озону відрізняються незначною мірою.

З експериментів випливає, що у стримерному коронному розряді витрати повітря під час виробленні озону по різному впливають на концентрацію озону в повітрі і необхідні для цього енерговитрати. У разі збільшенні витрат повітря (з 2 до 12 л/хв.), з одного боку, концентрація озону значно зменшується (від 2 до 0.4 мг/л), з іншого боку, зменшуються питомі енерговитрати (з 60 до 20 кВт·год/кг). Тому ймовірно існує оптимальна величина витрат повітря, яка може відрізнятися в залежності від призначення.

*Роботу виконано за рахунок держбюджетної теми «Розвиток теорії та моделювання нестаціонарних електрофізичних процесів в електропровідних і діелектричних середовищах імпульсних електромагнітних систем (шифр: Бар'єр-3)», КПКВК 6541030.*

1. Rizer Yu.P. Gas Discharge Physics. Springer. Berlin Heidelberg, 2011. 460 p.
2. Dai Y., Zhang Z., Deng J., Deng B. Study on the Process and Transition Mechanism of Different Stages in Positive and Negative Corona. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2024. Vol. 52. No 5. Pp. 1583-1600. DOI: https://doi.org/10.1109/TPS.2024.3389677.
3. Boiko M.I., Makogon A.V. Disinfectant treatment of liquids with high specific electrical conductivity by high-voltage nanosecond pulses with a subnanosecond front. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2025. No 5. Pp. 62-69. DOI: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.5.09.
4. Bolotov O.V., Taran G.V., Yegorov M.O. Electrodynamic and electrochemical characteristics of streamer corona discharge in an electrode system with water cathode. *Problems of atomic science technology (PAST).* 2025. No 4(158). Pp. 87-91. DOI: https://doi.org/10.46813/2025-158-087.
5. Bozhko I.V., Bereka V.O., Kondratenko I.P., Serdyuk Yu.V. Factors affecting homogeneity of a nanosecond impulse barrier discharge in air at atmospheric pressure and its physical nature. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2025. Vol. 58. No 34. 11 p. DOI: https://doi.org/10.1088/1361-6463/adf7b8.
6. Razevig D.V. High Voltage Engineering. Khanna Publishers, 2011. 726 p.
7. Bozhko I.V., Vasetsky Yu.M., Kondratenko I.P, Mashchenko O.A. Conditions for the emergence of positive streamer corona discharge in air in the needle-to-plane electric field. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2026. No 2. Pp. 15-26. DOI: http://doi.org/10.15407/techned2026.02.015.

## MULTI-NEEDLE ELECTRODE SYSTEM WITH A METAL DISC DESIGNED FOR OZONE PRODUCTION IN THE STREAMER CORONA DISCHARGE

**V.O. Bereka I.V. Bozhko, Yu.M. Vasetsky, I.P Kondratenko**
**Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,**
**56, Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine.**
**E-mail: yuriy.vasetsky@gmail.com.**

*The search for methods for taking into account a significant number of factors that affect the development of a positive corona discharge in technological processes determines the relevance of research in this area. The aim of the work is to determine for the streamer corona discharge in air at atmospheric pressure the influence of the geometric configuration of a multi-needle electrode system with a metal disk, as well as the air flow rate with its supply along the needles on the distribution of the electric field, the fulfillment of the avalanche-streamer transition condition, the ozone output and the energy consumption required for this. It is shown the existence of threshold values for the interelectrode voltage, needle lengths and distance between the needles, which limit the possibility of the appearance of streamers in the corona discharge. Based on the experimental results, in relation to energy consumption, it can be concluded that there are optimal values for the needle lengths and the distance between them. It was found that an increase in air flow in the electrode system during ozone production leads to a decrease in specific energy consumption and simultaneously to a decrease in ozone concentration. This relationship, depending on the purpose of the streamer corona discharge, must be taken into account in its practical application.* References 7, figures 4, tables 2.
***Key words**:* positive streamer corona, multi-needle electrode system, ozone output, energy consumption, optimization of the electrode system.

Надійшла 13.05.2026
Прийнята 16.06.2026