

# Моделювання високовольтного іонного діода з дратовим катодом при атмосферному тиску азоту

Андрієнко<sup>f</sup> О. В., ORCID [0000-0001-9930-4415](https://orcid.org/0000-0001-9930-4415)

Сидоренко С. Б., ORCID [0000-0002-3109-2011](https://orcid.org/0000-0002-3109-2011)

Кузьмичев<sup>s</sup> А. І., д.т.н. проф., ORCID [0000-0003-0087-275X](https://orcid.org/0000-0003-0087-275X)

Кафедра електронних пристроїв та систем [eds.kpi.ua](https://eds.kpi.ua)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)

Київ, Україна

Мельниченко М. С., ORCID [0000-0002-9461-4913](https://orcid.org/0000-0002-9461-4913)

ТОВ ТД ОТТОМ [ottom.com.ua](https://ottom.com.ua)

Харків, Україна

**Анотація**—Виконано фізико-топологічне моделювання високовольтного коаксіального іонного діода з дратовим металевим катодом при атмосферному тиску азоту в гідродинамічному дрейфово-дифузному наближенні. Були враховані реакції іонізації азоту електронами, приєднання електронів до молекул азоту з утворенням негативних іонів, рекомбінації заряджених частинок з протилежними знаками заряду, а також вторинна іонно-електронна емісія катода. Були розраховані в рамках самоузгодженої задачі розподіл потенціалу і густини (концентрації) заряджених частинок в міжелектродному проміжку, густини іонних і електронних струмів на електродах при наступних параметрах: діаметр дратяного металевого катода 0,01-0,16 мм, діаметр трубчастого анода 6 і 20 см, напруга 20-40 кВ, температура газу 300 і 600К. Визначено вплив геометрії, напруги і температури газу на параметри розряду. Розрахункові дані по струму розряду узгоджуються з експериментом. Отримані результати використовуються для розробки пристроїв для обробки металевих проводів та біологічних речовин іонами азоту.

**Ключові слова** — діоди; корона, газорозрядні пристрої, азот.

## I. ВСТУП

Іонні діоди являють собою двоелектродні структури, в яких створюється газовий розряд для генерації іонізованої, як правило хімічно та біологічно активної речовини. Іонні діоди, в яких використовується високовольтний розряд з нетермічною азотною плазмою при атмосферному тиску, знаходять застосування в промисловості для обробки матеріалів – азотування і нітрокарбідуювання для підвищення твердості, зносо- і корозійної стійкості [1-5], для електроочистки газових середовищ від пильових частинок і шкідливих речовин [6-8], в мікроелектронній технології – для обробки напівпровідникових пластин та тонких плівок [9, 10], в біомедицині – для знезаражування матеріалів і середовищ від бактерій, вірусів і грибків та для лікування [8, 10-23]. Класифікація даного розряду як нетермічного означає, що в ньому не використовується термоелектронна емісія катода і теплова іонізація газу. Через труднощі ініціювання і підтримання нетермічного розряду при атмосферному тиску між плоскими електродами застосовують

електроди у вигляді дратів або вістр, на яких сильно підвищується напруженість електричного поля, що забезпечує підтримання розряду при не дуже високій напрузі (20-30 кВ замість 100 кВ и більше) [11, 24]. Розряд з дратовими або вістряними електродами також називають коронним через локалізоване світіння газу в областях с високою напруженістю поля. Фізико-математичне моделювання суттєво полегшує конструювання високовольтних іонних діодів атмосферного тиску, замінюючи трудомісткі та дорогі експерименти, однак воно недостатньо розроблено і потребує свого розвитку. Більш-менш опрацьовано питання розрахунку напруги виникнення розряду атмосферного тиску [24-29], але також є потреба визначити і інші електричні характеристики розряду.

Мета даної роботи – визначення розподілів потенціалу і густини (концентрації) заряджених частинок в міжелектродному проміжку, густини іонних і електронних струмів на електродах, а також визначення впливу геометрії, напруги і температури газу на параметри розряду в іонному діоді.



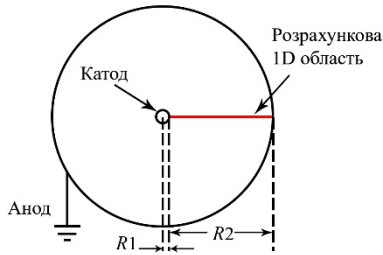


Рис. 1 Коаксіальна система електродів іонного діода

## II. ОПИС МОДЕЛІ РОЗРЯДУ

Система електродів — коаксіальна. Внутрішній катод являє собою тонкий дріт діаметром  $d = 2R_1$ , діаметр зовнішнього трубчатого електрода  $D = 2R_2$ , довжина катода — 30 см (Рис. 1). Розряд передбачається дифузним, симетричним і однорідним вздовж осі. Вважається, що температура  $T$  і фонові щільність  $N$  азоту постійні між електродами. Таким чином модель є одновимірною в радіальному напрямку між електродами і описує поведінку заряджених частинок за допомогою рівнянь в гідродинамічному дрейфово-дифузному наближенні. Для цього використовуємо рівняння для локального балансу частинок, самоузгоджено пов'язаних з рівняннями Пуассона для локального електричного поля:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_{e,p,n}) + \nabla \cdot \left[ \left( \frac{q}{e} \right) n_{e,p,n} (\mu_{e,n,p} \mathbf{E}) - \mathbf{D}_{e,p,n} \nabla n_{e,p,n} \right] = S_{e,p,n},$$

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad \rho = NkT,$$

де  $n$ ,  $\mu$  і  $\mathbf{D}$  — густина, рухливість і коефіцієнт дифузії частинок (індекси:  $e$  — електронів;  $p$  — позитивних і  $n$  — негативних іонів молекулярного азоту);  $q$  — заряд частинок;  $e$  — модуль заряду електронів;  $S$  — ефективна генерація (за виключенням загибелі) частинок,  $\mathbf{E}$  — напруженість поля,  $\varphi$  — електричний потенціал,  $\rho$  — густина просторового заряду,  $\varepsilon_0$  — електрична стала,  $P$ ,  $N$ ,  $T$  — тиск, густина і температура молекулярного азоту,  $k$  — константа Больцмана.

На електродах прийняті наступні умови для електронів: на катоді має місце вторинна іонно-електронна емісія, її коефіцієнт  $\gamma$  (2-й коефіцієнт Таунсенда) дорівнює  $\gamma = 0,05$ , на аноді електрони поглинаються без відбиття. Іони азоту на електродах перетворюються в нейтральні молекули без відбиття.

В міжелектродному проміжку нові електрони і позитивні іони генеруються в результаті іонізації молекул азоту прискореними електронами, іонізація описується стандартним рівнянням з використанням 1-го коефіцієнта Таунсенда  $\alpha$ . Генерація негативних іонів, рекомбінація позитивних і негативних іонів та електронів описується рівняннями приєднання електронів і рекомбінації в стандартній формі

з використанням відповідних коефіцієнтів цих реакцій. Вказані стандартні рівняння і залежності коефіцієнтів Таунсенда і вказаних реакцій від локальної приведенної напруженості електричного поля  $E(r)/N$  взяті з літератури [29-31].

Оскільки внаслідок високого тиску газу швидкість отримання енергії електронами від електричного поля локально зрівноважується швидкістю втрати енергії, ми змогли використовувати наближення локального поля, що означає, що електрони перебувають в локальній рівновазі з електричним полем, і середні властивості електронів можуть бути виражені як функція від наведеного електричного поля ( $E/N$ ). Тобто коефіцієнти переносу і джерела частинок добре параметризовані за допомогою наведеного електричного поля. Також відмітимо, що у наближенні локального поля рівняння для середньої енергії електронів не треба вирішувати, а це значно знижує складність чисельної задачі.

Система рівнянь вирішувалась методом кінцевих елементів і використовувалась схема Шарфеттера–Гаммела для усунення чисельної нестабільності числової щільності заряджених частинок, пов'язаної з методом кінцевих елементів [30]. Це необхідно, зокрема, поблизу катода, де потік іонів особливо високий.

## III. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗРЯДУ

На Рис. 2 і Рис. 3 наведені розподіл потенціалу і густини (концентрації) заряджених частинок по радіусу в міжелектродному проміжку для  $d = 2R_1 = 0,01$  мм,  $D = 2R_2 = 6$  см, напруга  $V = 20$  кВ,  $T = 300$  К. При інших значеннях параметрів вигляд розподілу потенціалу і густини заряджених частинок змінюється мало.

В Таблиця 1 наведені результати розрахунку параметрів високовольтного розряду в іонному діоді для різних  $D$ ,  $d$ , напруг  $V$  і двох температур газу  $T = 300$  К (кімнатної температури) і  $600$  К (температури, яка застосовується в процесах іонного азотування). В таблиці прийняті наступні позначення:  $j_{ic}$  і  $j_{ec}$  — густина іонного і електронного струмів на катоді;  $i_{ic}$  і  $i_{ec}$  — струми іонів і електронів на катоді;  $j_{ia}$  і  $j_{ea}$  — густина іонного і електронного струмів на аноді;  $i_{ia}$  і  $i_{ea}$  — струми іонів і електронів на аноді.

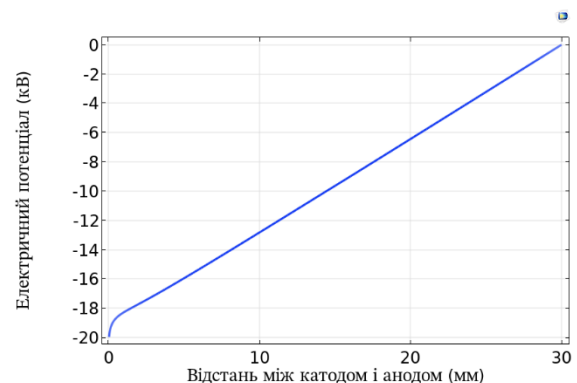


Рис. 2 Розподіл потенціалу в міжелектродному проміжку



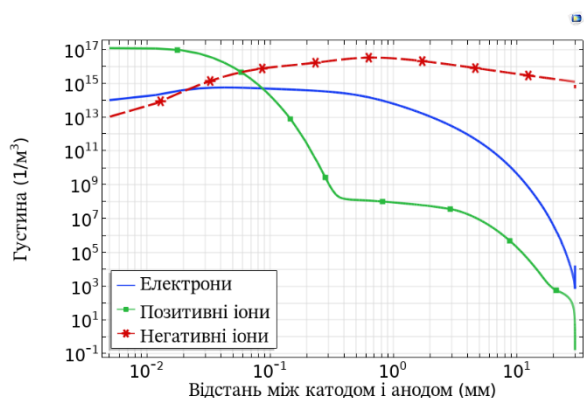


Рис. 3 Розподіл густини (концентрації) заряджених частинок в міжелектродному проміжку

#### IV. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ І ПОРІВНЯННЯ З ЕКСПЕРИМЕНТОМ

На Рис. 2 можна бачити, що в міжелектродному проміжку утворюються дві області – одна шириною порядку 1 мм з сильним і швидко змінним електричним полем поблизу катода і друга протяжна область дрейфу заряджених частинок вздовж до анода з меншою, але постійною величиною напруженості поля. Перша область показана у вигляді темної зони на

Рис. 1 і є характерною особливістю негативних коронних розрядів. В катодній області відбувається інтенсивна іонізація азоту з генерацією позитивних іонів і електронів (Рис. 3). У другій області густина позитивних іонів різко знижується через рекомбінацію і слабу іонізацію.

Реакція приєднання електронів к молекулам азоту починається практично поблизу поверхні катода і продовжується на протязі всієї катодної області, в області дрейфу концентрація негативних іонів поступово знижується, але саме вони разом з електронами забезпечують провідність газового середовища. Причому роль електронної провідності сильно знижується по мірі наближення до анода. Через малу рухливість негативних іонів і, відповідно, високого електричного опору області дрейфу падіння напруги на цій області являє значну частину розрядної напруги (~1,5 кВ на катодній області і 18,5 кВ на області дрейфу, Рис. 2).

Висока концентрація позитивних іонів поблизу дровового катода є позитивним фактором для процесу іонного азотування металевого дроту. Висока концентрація негативних іонів поблизу поверхні анода може бути використана для іонної обробки матеріалів і біологічних субстанцій, чутливих саме до цього типу іонів.

ТАБЛИЦЯ 1 ПАРАМЕТРИ ВИСОКОВОЛЬТНОГО РОЗРЯДУ

D, см	6					20				
	0,01	0,02	0,04	0,08	0,16	0,01	0,02	0,04	0,08	0,16
<b>V = 20 кВ, T = 300К</b>										
$j_{ic}, \text{mA/m}^2$	$1,96 \times 10^5$	$0,97 \times 10^5$	$0,47 \times 10^5$	$0,22 \times 10^5$	$0,10 \times 10^5$	14880	7600	3735	1750	780
$i_{ic}, \text{mA}$	1,85	1,827	1,77	1,658	1,5	0,14	0,143	0,1407	0,132	0,118
$j_{ia}, \text{mA/m}^2$	32,68	32,45	31,80	30,64	28,73	0,725	0,740	0,730	0,694	0,625
$i_{ia}, \text{mA}$	1,863	1,850	1,813	1,746	1,637	0,136	0,139	0,137	0,130	0,117
<b>V = 30 кВ, T = 300К</b>										
$j_{ic}, \text{mA/m}^2$	$4,68 \times 10^5$	$2,32 \times 10^5$	$1,13 \times 10^5$	$0,55 \times 10^5$	$0,26 \times 10^5$	$0,362 \times 10^5$	$0,186 \times 10^5$	$0,092 \times 10^5$	$0,044 \times 10^5$	$0,02 \times 10^5$
$i_{ic}, \text{mA}$	4,4	4,37	4,26	4,145	3,919	0,34	0,35	0,347	0,332	0,301
$j_{ia}, \text{mA/m}^2$	77,9	77,7	76,9	75,45	73,05	1,780	1,803	1,793	1,746	1,654
$i_{ia}, \text{mA}$	4,44	4,43	4,38	4,30	4,16	0,335	0,339	0,337	0,328	0,311
<b>V = 20 кВ, T = 600К</b>										
$j_{ic}, \text{mA/m}^2$	$5,9 \cdot 10^5$	$3,0 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^5$	$0,7 \cdot 10^5$	$0,4 \cdot 10^5$	$0,34 \times 10^5$	$0,17 \times 10^5$	$0,085 \times 10^5$	$0,004 \times 10^5$	$0,002 \times 10^5$
$j_{ia}, \text{mA/m}^2$	99,2	98,9	97,7	95,25	91,05	1,67	1,69	1,688	1,651	1,578
<b>V = 40 кВ, T = 600К</b>										
$j_{ic}, \text{mA/m}^2$	$1,44 \times 10^7$	$0,68 \times 10^7$	$0,31 \times 10^7$	$0,135 \times 10^7$	$0,06 \times 10^7$	$1,50 \times 10^5$	$0,77 \times 10^5$	$0,38 \times 10^5$	$0,19 \times 10^5$	$0,009 \times 10^5$
$j_{ia}, \text{mA/m}^2$	1835	1745	1614	1440	1263	7,512	7,573	7,5755	7,518	7,396



Аналіз струмових даних, наведених в Таблиці 1, також підтверджує наш висновок про те, що саме іонна провідність забезпечує проходження електричного струму в розглянутому розряді і служить фізичним поясненням назви досліджуваної електродної структури як іонний діод. Зменшення діаметрів дрового катода і трубчатого анода і підвищення напруги призводять до збільшення струму іонів і електронів на обидва електроди. Підвищення температури газу призводить до підвищення іонного струму на обох електродах, але до підвищення електронного струму лише на катоді.

Для експериментальної валідації розрахункових даних був проведений експеримент з коаксіальним іонним діодом, який входить у склад озонатору [32] з дровим катодом з вольфраму, в який замість кисню подавали азот. Діод мав діаметр катода 0,01 мм, діаметр зовнішнього трубчатого анода 62 мм, довжину дрового катода – 30 см. При температурі 300К і напрузі 20 кВ, струм розряду складає 2,1 мА, що дуже близько до розрахункового значення 1,85 мА (Таблиця 1).

#### ВИСНОВКИ

- 1) Виконано фізико-топологічне моделювання високовольтного коаксіального іонного діоду з дровим катодом при атмосферному тиску азоту в гідродинамічному дрейфово-дифузному наближенні. Були враховані реакції іонізації азоту електронами, приєднання електронів до молекул азоту з утворенням негативних іонів, рекомбінація заряджених частинок з протилежними знаками заряду, вторинна іонно-електронна емісія катода.
- 2) Були розраховані в рамках самоузгодженої задачі розподілу потенціалу і густини (концентрації) заряджених частинок в міжелектродному проміжку, густини іонних і електронних струмів на електродах.
- 3) Визначено вплив геометрії, напруги і температури газу на параметри розряду. Отримані розрахункові дані по струму розряду узгоджуються з експериментом.
- 4) Показано, що в розряді переважає іонна провідність з більшим падінням напруги на області дрейфу частинок в міжелектродному проміжку.
- 5) Виявлено, що найбільша концентрація позитивних іонів утворюється поблизу катода, а негативних – уздовж всього міжелектродного проміжку. Це можна використовувати в процесах іонного азотування дрових металевих матеріалів і обробки матеріалів і біологічних субстанцій (бактерій, вірусів, грибків), чутливих до негативних іонів, при розташуванні носіїв цих субстанцій поблизу анода. Для реалізації останнього доцільно модифікувати конструкцію зовнішнього анода для ефективного вилучення іонів азоту

у зовнішнє середовище. Також доцільно продовжити дослідження у напрямку підвищення енергетичної ефективності іонної генерації шляхом визначення способу максимально допустимого зниження падіння напруги в області дрейфу заряджених частинок.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Miyamoto, J., Inoue, T., Tokuno, K., Tsutatori, H., & Abraha, P. Surface Modification of Tool Steel by Atmospheric-Pressure Plasma Nitriding Using Dielectric Barrier Discharge. *Tribology Online*, 11(3), 460–465, 2016. DOI: [10.2474/trol.11.460](https://doi.org/10.2474/trol.11.460).
- [2] Y. Yoshimitsu, R. Ichiki, K. Kasamura, M. Yoshida, S. Akamine, & S. Kanazawa, “Atmospheric-pressure-plasma nitriding of titanium alloy”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 54(3), 030302, 2015. DOI: [10.7567/jjap.54.030302](https://doi.org/10.7567/jjap.54.030302)
- [3] R. Milani, R. Cardoso, P. Belmonte, T. Figueroa, C. A. Perotoni, C. A. Zorzi, J. E. Baumvol, I. J. R. “Nitriding of yttria-stabilized zirconia in atmospheric pressure microwave plasma” *Journal of Materials Research*, 24(06), 2021–2028, 2009. DOI: [10.1557/jmr.2009.0245](https://doi.org/10.1557/jmr.2009.0245)
- [4] Andrzej R. Olszyna, Aleksandra Sokolowska, Barbara Kulakowska-Pawlak, Jerzy Dora, “Surface Modification of Al2O3-Cr Ceramic by Non-isothermal N2 Plasma Treatment at Atmospheric Pressure” *Plasma Process. Polym.*, 4, S507–S511, 2007. DOI: [10.1002/ppap.200731216](https://doi.org/10.1002/ppap.200731216)
- [5] I. M. Pastukh, “Teoriya i praktika bezvodородного азотирования в тлейушhem razryade”, Kha'kov: NNC HFTI, 2006. ISBN: 966-8855-14-0
- [6] A.V. Samusenko, Yu.K. Stishkov, “Elektrofizicheskie procesy v gazakh pri vozdeystvii silnykh elektricheskikh polej”, *Uch.-metod. Posobie.*– SPb.: VVM, 2012.
- [7] Alyen Abahazem, Hasna Guedah, Nofel Merbahi, Mohamed Yousfi, Olivier Eichwald, Ahmed Ihlal, “Energy Injected in Multi-tip Pulsed Corona Discharge Reactor in Air at Atmospheric Pressure for Pollution Control”, *Materials Today: Proceedings*, 2(9), 4694–4700, 2015. DOI: [10.1016/j.matpr.2015.10.001](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.10.001)
- [8] S. Guceri, A. Fridman (eds.), *Plasma Assisted Decontamination of Biological and Chemical Agents*, Springer, 2008. ISBN: 978-1-4020-8439-3.
- [9] V. M. Elinson, A. V. Shvedov, Yu. Kukushkin, “Optical properties of fluorocarbon coatings obtained by ion-plasma method at atmospheric pressure in dynamic mode of deposition”, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1396 012014, 2019. DOI: [10.1088/1742-6596/1396/1/012014](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1396/1/012014)
- [10] V. M. Elinson, E. D. Kravchuk and P. A. Schur, “The study of relief parameters of fluorocarbon coatings antiadhesive to microorganisms formed on polymer materials”, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1396 012015, 2019. DOI: [10.1088/1742-6596/1396/1/012015](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1396/1/012015)
- [11] O.V. Andrienko, I.M. Drozd, A.I. Kuzmichev, “Gas discharge atmospheric pressure systems for the biomedical use”, *Elektronna ta akustichna inzheneriya.*, vol.3, no.3, pp. 5-10, 2020
- [12] H. Tanaka, K. Ishikawa, M. Mizuno et al., “State of the art in medical applications using non-thermal atmospheric pressure plasma”, *Rev. Mod. Plasma Phys.*, vol. 1, no. 3, pp. 1–90, 2017. DOI: [10.1007/s41614-017-0004-3](https://doi.org/10.1007/s41614-017-0004-3).
- [13] D.B. Graves, “Mechanisms of Plasma Medicine: Coupling Plasma Physics, Biochemistry, and Biology”, *IEEE Trans. Rad. Plasma Med. Sci.*, vol. 1, no. 4, pp. 281–292, 2017. DOI: [10.1109/TRPMS.2017.2710880](https://doi.org/10.1109/TRPMS.2017.2710880).
- [14] Th. von Woedtke, H.-R. Metelmann, K.-D. Weltmann «Clinical Plasma Medicine: State and Perspectives of in Vivo Application of Cold Atmospheric Plasma», *Contrib. Plasma Phys.*, vol. 54, no. 2, pp. 104–117, 2014. DOI: [10.1002/ctpp.201310068](https://doi.org/10.1002/ctpp.201310068).



- [15] Th. von Woedtke, S. Reuter, K. Masur, «Plasmas for medicine,» *Physics Reports*, vol. 530, no. 4, pp. 291–320, 2013. DOI: [10.1016/j.physrep.2013.05.005](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2013.05.005)
- [16] M. Laroussi, M. Kong, G. Morfill, W. Stolz (eds.), “Application of low-temperature gas plasmas in medicine and biology”, *Plasma Medicine*, Cambridge Univ. Press, 2012. ISBN: 978-1107006430
- [17] Z. Machala, K. Hensel, Yu. Akishev (eds.), “Plasma for Bio-Decontamination”, *Medicine and Food Security*, Springer, 2012. URL: <https://www.springer.com/gp/book/9789400728516>
- [18] D.B. Graves, “The emerging role of reactive oxygen and nitrogen species in redox biology and some implications for plasma applications to medicine and biology,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 26, pp. 263001-1–263001-42, 2012. DOI: [10.1088/0022-3727/45/26/263001](https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/26/263001).
- [19] M. Laroussi, “Low-temperature plasmas for medicine” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 37, no. 6, pp. 714–725, 2009. DOI: [10.1109/TPS.2009.2017267](https://doi.org/10.1109/TPS.2009.2017267)
- [20] V. N. Vasilets, A. F. Gutsol, A. B. Shekhter, A. Fridman, “Khimiya vysokikh energy” *Plasmennaya meditsina* [Plasma medicine], vol. 43, no. 3, pp. 276–280, 2009. URL: <https://revolution.allbest.ru/medicine/d00418889.html>
- [21] M. Kong, G. Morfill, T. Nosenko et al., «Plasma medicine: an introductory review,» *New J. Phys.*, vol. 11, pp. 115012-1–115012-35, 2009. DOI: [10.1088/1367-2630/11/11/115012](https://doi.org/10.1088/1367-2630/11/11/115012).
- [22] G. Fridman, G. Friedman, A. Gutsol et al., “Applied Plasma Medicine”, *Plasma Proc. Polym.*, vol. 5, no. 6, pp. 503–533, 2008. DOI: [10.1002/ppap.200700154](https://doi.org/10.1002/ppap.200700154).
- [23] A. I. Kuzmichev, V.D. Tsydelko, «Primenenie razryadov atmosfernogo davleniya s netermicheskoy plasmoy i vtorichnymi emitterami v biomedichinskoj apparature [Application of atmospheric pressure discharges with non-thermal plasma and secondary emitters in biomedical apparatus],» *Kharkovskaya chirurgicheskaya shkola*, no. 3 (26), pp. 199-200, 2007.
- [24] Yu. P. Rajzer, “Fizika gazovogo razryada” - 3-e izd., pererab. i dop. - Dolgoprudnyj: Intellekt, 2009. ISBN: 978-5-91559-019-8
- [25] A. Talsky, O. Štec, M. Pazderka, and V. Kudrle, “Kinetic Study of Atmospheric Pressure Nitrogen Plasma Afterglow Using Quantitative Electron Spin Resonance Spectroscopy”, *Journal of Spectroscopy*, Article ID 5473874, 10 pages, 2017. DOI: [10.1155/2017/5473874](https://doi.org/10.1155/2017/5473874)
- [26] T. N. Zubkov, A. V. Samusenko, Yu. K. Stishkov. “Modelirovanie ochagovoj formy otriczatel'nogo koronnogo razryada v sisteme elektrodov igla-ploskost”, *Elektronnaya obrabotka materialov*, 49(6), 30–35, 2013.
- [27] P. Sattari, K. Adamiak, “Numerical Simulation of Trichel Pulses in a Negative Corona Discharge in Air” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, 1935–1943, 2010. DOI: [10.1109/tia.2011.2156752](https://doi.org/10.1109/tia.2011.2156752)
- [28] E. V. Kislyakova, “Modelirovanie koronnogo razryada v elektrootriczatel'nom i neitral'nom gazakh”, *Molodoj uchyonyj*, # 2 (61) Fevral, 2014.
- [29] A. V. Buyanov, I. A. Elagin, M. A. Pavlejno, Yu. K. Stishkov, A. A. Statuya, “Modelirovanie koronnogo razryada metodom Dejcha-Popkova v srede ANSYS”, *Sbornik dokladov 7-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferenczii “Sovremennye problemy elektrofiziki i elektrogidrodinamiki zhidkostej”*, 2003.
- [30] Plasma Module User's Guide. [Online]. Available: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.plasma/PlasmaModuleUsersGuide.pdf>
- [31] J. Michael, Brunger, J. Stephen, “Buckman Electron–molecule scattering crosssections” I. Experimental techniques and data for diatomic molecules, *Physics Reports*, vol. 357, pp. 215-458, 2002. DOI: [10.1016/S0370-1573\(01\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(01)00032-1)
- [32] O.V. Andrienko, I.M. Drozd, A.I. Kuzmichev, “Generator ozonu na koronnomu rozryadi z drotovim katodom”, *Prikladni naukovo-tekhnicni doslidzhennya: zb. tez dop. IV mizhnar. nauk.-prakt. konf., m. Ivano-Frankivsk*, 1-3 kvit. Ivano-Frankivsk, Tom.1, S. 121-122, 2020.

Надійшла до редакції 05 грудня 2020 року



# Simulation of High-Voltage Ion Diode with Wire Cathode at Atmospheric Pressure of Nitrogen

O. V. Andriienko<sup>f</sup>, ORCID [0000-0001-9930-4415](https://orcid.org/0000-0001-9930-4415)

S. B. Sydorenko, ORCID [0000-0002-3109-2011](https://orcid.org/0000-0002-3109-2011)

A. I. Kuzmychiev<sup>g</sup>, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0003-0087-275X](https://orcid.org/0000-0003-0087-275X)

Department of Electronic Devices and Systems [eds.kpi.ua](http://eds.kpi.ua)

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)  
Kyiv, Ukraine

M. S. Melnychenko, ORCID [0000-0002-9461-4913](https://orcid.org/0000-0002-9461-4913)

TD OTTOM LTD [ottom.com.ua](http://ottom.com.ua)

Kyiv, Ukraine

**Abstract**—Physic-topological simulation of a high-voltage coaxial ion diode with a wire metal cathode at atmospheric nitrogen pressure in the hydrodynamic drift-diffusion approximation is performed. The reactions of nitrogen ionization by electrons, attachment of electrons to nitrogen molecules with the formation of negative ions, recombination of charged particles with opposite signs of charge, secondary ion-electron emission of the cathode were taken into account. The distribution of potential and density (concentration) of charged particles in the interelectrode gap, the density of ionic and electron currents at the electrodes were calculated within the self-consistent problem with the following parameters: diameter of wire metal cathode 0.01-0.16 mm, diameter of tubular anode 6 or 20 cm, voltage 20-40 kV, gas temperature 300 or 600K. The influence of geometry, voltage and gas temperature on the discharge parameters has been determined. The obtained calculated data on the discharge current are consistent with the experiment. It is shown that two zones are formed in the discharge between the electrode gap – one is with a width of about 1 mm with a strong and rapidly changing electric field near the cathode and the second long zone with the drift of charged particles towards the anode with a smaller but constant field strength. This is a characteristic feature of negative corona discharges. In the cathode zone there is an intensive ionization of nitrogen with the generation of positive ions and electrons. In the second zone, the density of positive ions decreases sharply due to recombination and weak ionization. The reaction of attachment of electrons to nitrogen molecules begins almost near the cathode surface and continues throughout the cathode zone, in the drift zone the concentration of negative ions gradually decreases. Moreover, the role of electronic conductivity is greatly reduced as we approach the anode. Due to the low mobility of negative ions and, accordingly, the high electrical resistance of the drift zone, the voltage drop on this space part represents a significant portion of the discharge voltage (~1.5 kV on the cathode zone and 18.5 kV on the drift space, at the total voltage of 20 kV). The fact that the highest concentration of positive ions is formed near the cathode, and negative – along the entire interelectrode gap, it can be used, respectively, in the processes of ionic nitriding of wire cathode metal materials and for processing materials and biological substances (bacteria, viruses, fungi), sensitive to negative ions, at the location of the carriers of these substances near the anode. To implement the latter, it is advisable to modify the design of the external anode for efficient extraction of nitrogen ions into the environment. It is also advisable to continue research in the direction of increasing the energy efficiency of ion generation by determining the method of the maximum allowable reduction of the voltage drop on the space of drift of charged particles.

**Keywords** — diodes; corona; gas discharge devices; nitrogen.

