

ДИНАМІКА ДВОГОЛОВОГО СТРИМЕРА В ПОВІТРІ: ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДЛЯ МІЖЕЛЕКТРОДНОГО ПРОМІЖКУ 0.3 СМ

М. М. Заблодський, доктор технічних наук, професор

О. І. Ковальчук, аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: orest.kovalchuk@nubip.edu.ua

Анотація. У роботі методом гідродинамічного моделювання досліджено динаміку двоголового стримерного розряду в повітрі при напрузі 14 кВ. Чисельне моделювання в COMSOL Multiphysics (двовимірна осьово-симетрична геометрія, метод скінченних елементів) виявило суттєві відмінності в розвитку позитивного та негативного стримерів у зазорі 0.3 см: негативний стример демонструє високу початкову швидкість (0.4 см/нс), яка швидко зменшується, обмежуючи максимальну пройдену відстань (0.15 см), тоді як позитивний стример прискорюється з часом (до 0.0378 см/нс), долаючи більшу дистанцію (0.14 см) завдяки вищій щільності електронів (до 3.34×10^{20} 1/м³) та інтенсивнішому електричному полю (375×10^5 В/м проти 119×10^5 В/м у негативному). Отримані результати підтверджують здатність моделі точно відтворювати просторово-часову еволюцію стримерів, що важливо для розробки високовольтних пристроїв та аналізу пробійних явищ. Дослідження виконувалось при тиску 760 Торр з кроком 0.05 нс протягом 3.75 нс.

Ключові слова: двоголовий стример, стримерний розряд, чисельне моделювання, повітряний проміжок, міжелектродний проміжок, COMSOL Multiphysics, гідродинамічна модель, позитивний стример, негативний стример, пробій повітря, високовольтний розряд

Актуальність. Стримерні розряди – короткочасні ниткоподібні розряди, що виникають у газах під дією сильного електричного поля. Вони є фронтами іонізації з самопосилюючим полем на кінчиках, здатними досягати високих густин електронів і активних частинок [1, 2]. Їх розвиток починається з лавинного множення зарядів (аналогічно до механізму розряду Таунсенда [3]), але при критичній напрузі переходить у режим з утворенням просторового заряду [4].

Стримери є попередниками іскр та блискавок, а також застосовуються у плазмових реакторах, пальниках, очисниках повітря, генераторах озону та медичних пристроях [1, 2]. Вивчення їх динаміки важливе для розробки високовольтних

систем і мікророзрядних приладів. Особливий інтерес становлять двоголові стримери, де з одного електронного зародка розвиваються два фронти іонізації: позитивний (до катода) та негативний (до анода). У такому випадку електрони витісняються вперед негативного стримера, тоді як для позитивного необхідна додаткова фотоіонізація [4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вивчення електричних розрядів включає три основні методики: теоретичний аналіз, експерименти та комп'ютерне моделювання [3]. При напруженості електричного поля, достатній для іонізації газу, виникають нерівноважні плазмові розряди [5]. У таких розрядах утворюються стримери – іонізовані канали, які є об'єктом дослідження у роботах [6-8]. Вони проявляються як тонкі іонізовані нитки канали, що розвиваються через локальне підсилення електричного поля [9]. У плоскопаралельній геометрії розрізняють два типи стримерів: катодно-спрямовані (рух з напрямком електронів) та анодно-спрямовані (рух проти напрямку електронів) [5-10]. Ключовими особливостями стримерів є підвищена напруженість поля на кінцях понад 10 еВ ініціюючи хімічні реакції [8], формування квазінейтральних плазмоподібних каналів під час роз витку стримерів а також швидкість поширення $\sim 10^7$ см/с (1% швидкості світла) [11, 12] тому пробій у вузьких проміжках в декілька міліметрів відбувається за наносекунди. Через швидкоплинність процесів (наносекундний діапазон) [1] моделювання стало ключовим інструментом в дослідженні цього типу розрядів. Перші 2D-моделі були розроблені в [12], а сучасні дослідження зосереджені на аналізі впливу ударної іонізації, процесів рекомбінації та формуванні двоголових стримерів. Отже моделювання дозволяє вивчати поведінку стримерів, які важко спостерігати експериментально. Особливий інтерес становлять дослідження стримерів у повітрі, що мають практичне значення для електроенергетики.

Мета дослідження – виконати математичну модель двоголового стримерного розряду для теоретичного дослідження розвитку позитивного і негативного стримерів у повітрі при міжелектродному зазорі 0.3 см і напрузі 14 кВ, проаналізувати їх просторово-часову еволюцію.

Матеріали та методи дослідження. Експериментальні дослідження (рис. 1) в коаксіальній системі з регульованою напругою виявили, що стримерний розряд між електродами виникає при досягненні порогового значення напруги ~ 14 кВ. Для теоретичного аналізу цього явища спочатку було розроблено математичну модель Таунсенда [3], яка дозволила дослідити перехід від таунсендівського до стримерного механізму розряду. На основі отриманих результатів було розширено дослідження шляхом моделювання двоголового стримерного розряду в аналогічних умовах, але з спрощеною геометрією системи.

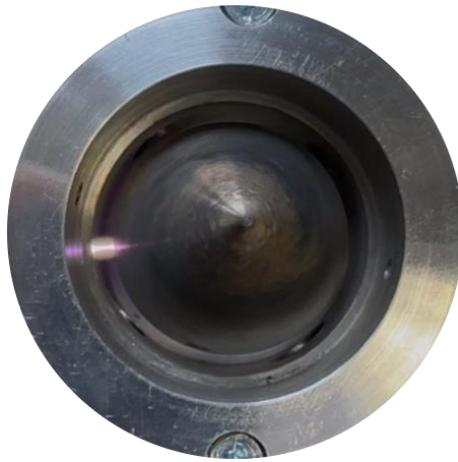


Рис. 1. Розряд пробою стримера в найменшому проміжку 0.3 см

Дослідження проведено за допомогою гідродинамічної (дрейф-дифузійної) моделі плазми в осьово-симетричній 2D-геометрії. В основі моделі – рівняння переносу зарядів (для електронів і іонів) і рівняння Пуассона для потенціалу.

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot (-n_e \mu_e \cdot \mathbf{E} - D_e \cdot \nabla n_e) = R_e \quad (1)$$

де $\partial t / \partial n_e$ – часова зміна концентрації електронів; $-n_e \mu_e \cdot \mathbf{E}$ – конвекційний струм, де n_e – концентрація електронів, μ_e – рухливість електронів 2.9×10^5 см²/(В·с), а \mathbf{E} – електричне поле; $-D_e \cdot \nabla n_e$ – дифузійний струм, де D_e – коефіцієнт дифузії електронів (м²/с); R_e – швидкість генерації або втрати електронів (частинок на м³·с) [13].

$$R_e \sum_{j=1}^M x_j k_j N_n n_e \quad (2)$$

де R_e – швидкість генерації або втрати електронів (частинок на м³·с); M – кількість різних реакцій або каналів взаємодії; x_j – стехіометричний коефіцієнт (або ефективна кількість електронів, які створюються або витрачаються в j -ій реакції); k_j – константа швидкості реакції (м³/с); N_n – концентрація нейтральних частинок (1/м³); n_e –

концентрація електронів ($1/\text{м}^3$). Для розрядів з переважанням дрейфу краще використовувати коефіцієнти Таунсенда замість коефіцієнтів швидкості для визначення швидкостей реакцій [15].

Електростатичне поле обчислюється за допомогою рівняння Пуассона описаної в теорії інтерфейсу електростатики модуля плазми [13]:

$$-\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V) = P \quad (3)$$

де ∇V – градієнт електричного потенціалу (В/м); ε_0 – електрична стала (Ф/м); ε_r – відносна діелектрична проникність середовища; V – електричний потенціал (В); P – густина заряду (Кл/м³).

Густина просторового заряду P автоматично обчислюється на основі хімічного складу плазми, заданого в моделі, за формулою [13]:

$$P = q(\sum_{k=1}^N Z_k n_k - n_e) \quad (4)$$

де P – густина заряду (Кл/м³); q – елементарний заряд (Кл); Z_k – зарядове число k -го іона; n_k – концентрація іонів типу k ($1/\text{м}^3$); n_e – концентрація електронів ($1/\text{м}^3$); N – кількість типів іонів;

Розрахунки виконані у середовищі COMSOL Multiphysics, яке дозволяє реалізувати модель скінченних елементів для плазмових розрядів [13]. У початковий момент часу у розрахунок введено гаусовий “зародок” електронної плазми із густиною 10^8 – 10^{14} $1/\text{м}^3$ (параметри шару: $z_0=1.5$ мм, $sz=0.132$ мм, $sr=0.104$ мм), що симулює передіонізацію між електродами. Основні параметри моделювання: тиск 760 Торр (1 атм), мобільність електронів 2.9×10^5 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, іонів 2.6×10^3 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ [14]. Валовий розподіл електричного потенціалу у проміжку сформовано за допомогою граничних умов на електродах (14 кВ на аноді, катод на нулі потенціалу). Малі розмірні кроки сітки з загальною кількістю елементів 16.623 та середньою якістю 0.9532 що є хорошим показником близьким одиниці (рис. 2.).

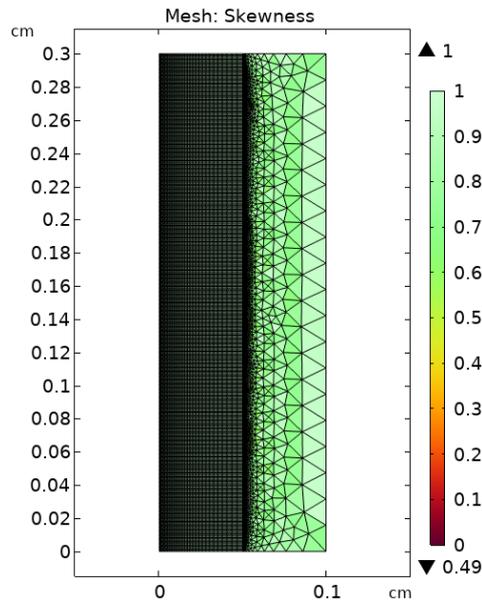


Рис. 2. Розрахункова сітка

Обчислення виконано в часовому модулі з такими граничними значеннями: старт 0, крок 0.05, фініш 3.8 нс (наносекунди). Для реалізації моделі використано модуль Plasma Module, описаний у документації COMSOL Multiphysics [13].

Результати та їх обговорення. У цій роботі було досліджено динаміку розвитку позитивного та негативного стримерних розрядів у повітряному зазорі 0.3 см за допомогою експериментальних вимірювань та комп'ютерного моделювання. За заданих умов ініціація стримера відбувається в центрі міжелектродного зазору та поширюється в обох протилежних напрямках. Початковий заряд розташований у центрі проміжку та має гауссову форму [14, 16].

За даними таблиць 1 і 2 можна простежити ключові відмінності у поведінці позитивного та негативного стримерів:

1. ІНФОРМАЦІЯ ПРО НЕГАТИВНИЙ СТРИМЕР

<i>Час розвитку нс</i>	<i>Дистанція см</i>	<i>Швидкість см/нс</i>	<i>Щільність електронів 1/м³</i>
0.05	0.02	0.4	9.62E18
0.45	0.04	0.0889	5.42E18
0.9	0.074	0.0822	6.63E18
1.35	0.078	0.0578	9.35E18
1.8	0.099	0.055	8.68E18
2.25	0.12	0.0533	1.47E19
2.6	0.14	0.0538	2.23E19
2.95	0.15	0.0508	1.47E20
3.3	0.15	0.0455	1.41E20
3.7	0.15	0.0405	1.43E20

Негативний стример характеризується високою початковою швидкістю (0.4 см/нс), яка, однак, швидко зменшується впродовж перших наносекунд. До моменту 3.7 нс (наносекунди) його швидкість падає до 0.0405 см/нс, а пройдена відстань досягає 0.15 см.

2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПОЗИТИВНИЙ СТРИМЕР

<i>Час розвитку нс</i>	<i>Дистанція см</i>	<i>Швидкість см/нс</i>	<i>Щільність електронів 1/м³</i>
0.05	0.02	0.4	9.62E18
0.45	0.023	0.0511	3.22E18
0.9	0.025	0.0278	3.56E18
1.35	0.029	0.0215	1.66E19
1.8	0.036	0.02	5.79E19
2.25	0.048	0.0213	1.33E20
2.6	0.063	0.0242	1.22E20
2.95	0.082	0.0278	1.55E20
3.3	0.107	0.0324	1.41E20
3.7	0.14	0.0378	3.34E20

Позитивний стример, навпаки, спочатку рухається повільніше (0.4 см/нс на початку, з подальшим зниженням до 0.02 см/нс), але з часом його швидкість поступово зростає, досягаючи 0.0378 см/нс на фінальній стадії що узгоджується з типовими вимірами швидкості [17, 18]. Щільність електронів також демонструє різну динаміку де у негативного стримера вона коливається в межах 5.42×10^{18} – 1.47×10^{20} 1/м³, з різким зростанням після 2.25 нс. У позитивного стримера спостерігається стрімке збільшення концентрації електронів – від 3.22×10^{18} 1/м³ на початковій стадії до 3.34×10^{20} 1/м³ наприкінці процесу.

Ці відмінності можна пояснити різними механізмами іонізації в залежності від полярності стримера. На рис. 3 і 4 представлено просторовий розподіл електронної густини та іонів, що підтверджує більш інтенсивні процеси у позитивного стримера.

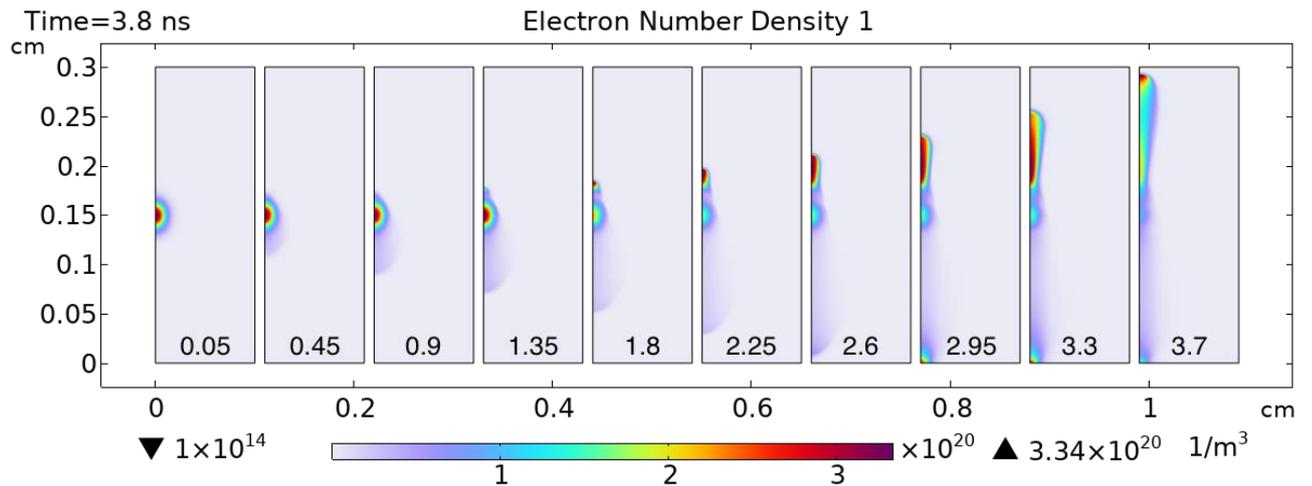


Рис. 3. Зображення динаміки розвитку електронної густини вздовж осі в повітряному зазорі 0.3 см в момент часу.

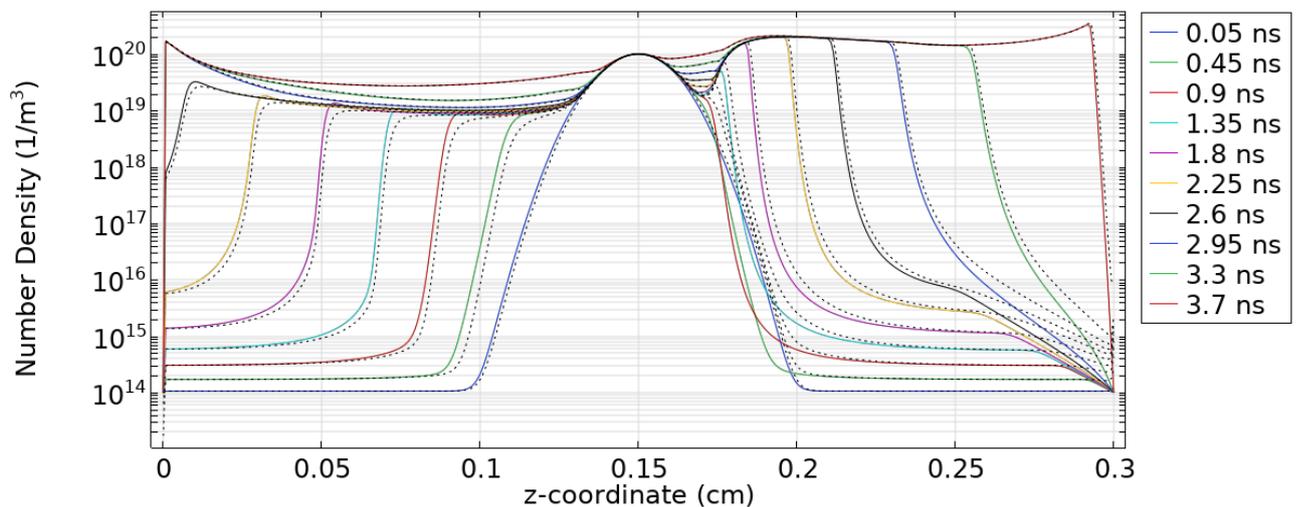


Рис. 4. Просторовий розподіл електронів (кольорові лінії) та густина іонів (чорні пунктирні лінії) вздовж осі симетрії.

За даними таблиці 3 видно, що напруженість електричного поля вздовж осі симетрії суттєво відрізняється для двох типів стримерів: У позитивного стримера електричне поле поступово зростає, досягаючи 375.18×10^5 В/м до кінця дослідження. У негативного стримера поле спочатку збільшується, але після 2.6 нс починає зменшуватись, стабілізуючись на рівні $48.5\text{--}52 \times 10^5$ В/м.

3. ЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ВЗДОВЖ ОСІ СИМЕТРІЇ ПОЗИТИВНОГО ТА НЕГАТИВНОГО СТРИМЕРІВ

Час розвитку нс	Позитивний стример В/м	Негативний стример В/м
0.05	56.92E5	56.638E5
0.45	90.916E5	71.265E5
0.9	119.23E5	75.744E5
1.35	152.23E5	80.783E5
1.8	191.49E5	87.04E5
2.25	210.2E5	95.07E5
2.6	202.37E5	119E5
2.95	190.71E5	50E5
3.3	188.95E5	48.5E5
3.7	375.18E5	52E5

На рис. 5 показано просторовий розподіл електричного поля, який підтверджує, що позитивний стример створює значно потужніше поле, що сприяє інтенсивнішій іонізації та швидшому розвитку.

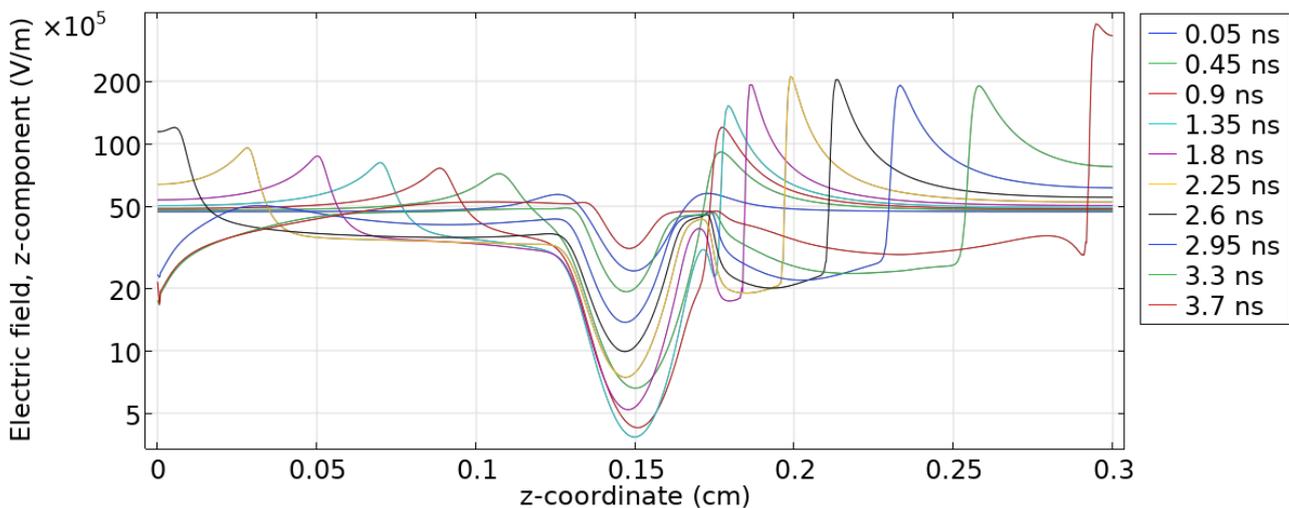


Рис. 5. Зображення просторового розподілу вздовж «осі симетрії» z-компоненти електричного поля для кількох моментів часу під час поширення стримера для міжзонової відстані 0,3 см (права половина представляє позитивний стример, а ліва – негативний)

Отримані дані свідчать про те, що позитивний стример має більш прогресуючий характер розвитку, що пов'язано з його здатністю до самоузгодженого посилення електричного поля в головній області. Негативний стример швидко втрачає енергію через рекомбінаційні процеси, що обмежує його дальність поширення. Щільність електронів є ключовим параметром, який визначає

інтенсивність іонізації та швидкість розвитку стримера. Отримані результати узгоджуються з дослідженнями [19].

Висновки і перспективи. У результаті дослідження виявлено суттєві відмінності в динаміці розвитку позитивних та негативних стримерів у повітряному проміжку за напруги 14 кВ. Негативний стример демонструє високу початкову швидкість (~0.4 см/нс), яка швидко знижується, обмежуючи його подальше поширення (до 0.15 см). Натомість позитивний стример поступово прискорюється (до 0.0378 см/нс) і долає більшу відстань (до 0.14 см), що пов'язано з інтенсивнішим електричним полем (до 375.18×10^5 В/м) та вищою електронною щільністю (до 3.34×10^{20} 1/м³).

Отримані результати підтверджують ефективність використаної гідродинамічної моделі для опису просторово-часової еволюції стримерних розрядів. Це має практичне значення для прогнозування пробійних явищ у вузьких міжелектродних зазорах та розробки високовольтних захисних систем. У подальших дослідженнях доцільно розглянути вплив параметрів середовища (тиск, температура, вологість) та зовнішніх збурень на стримерну динаміку, а також моделювати тривимірні конфігурації та інші газові суміші.

Список використаних джерел

1. Nijdam S., Teunissen J., Ebert U. The physics of streamer discharge phenomena. *Plasma Sources Science and Technology*. 2020. Vol. 29, no. 10. P. 103001. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/abaa05> (date of access: 19.07.2025).
2. Uamran D. A., Khalaf T. H. Study for electrical breakdown within dielectric liquids due to streamer discharge in rod-to-plane electrodes configuration. *Materials Today: Proceedings*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.002> (date of access: 19.07.2025).
3. Numerical Modeling and Investigation of Streamer Breakdown in a Coaxial Plasma Torch Based on Townsend Processes / N. Zablodskiy et al. *2024 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*, Dubai, United Arab Emirates, 27–28 December 2024. 2024. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/iceet65156.2024.10913556> (дата звернення: 24.04.2025).
4. Inception and growth of an electrodeless atmospheric double-headed streamer / S. Iseni et al. *Physical Review E*. 2025. Vol. 111, no. 2. URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.111.023202> (date of access: 19.07.2025).
5. Montijn C., Hundsdorfer W., Ebert U. An adaptive grid refinement strategy for the simulation of negative streamers. *Journal of Computational Physics*. 2006. Vol. 219,

no. 2. P. 801–835. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2006.04.017> (date of access: 19.07.2025).

6. Singh S (2017), Computational framework for studying charge transport in high-voltage gas- insulated systems, Department of Electrical Engineering Chalmers University of Technology.

7. Teunissen J., Malagón-Romero A. Data-driven reduced modeling of streamer discharges in air. *Computer Physics Communications*. 2025. P. 109733. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2025.109733> (date of access: 19.07.2025).

8. Nijdam S., Teunissen J., Ebert U. The physics of streamer discharge phenomena. *Plasma Sources Science and Technology*. 2020. Vol. 29, no. 10. P. 103001. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/abaa05> (date of access: 19.07.2025).

9. Geary J. M., Penney G. W. Charged-sheath model of cathode-directed streamer propagation. *Physical Review A*. 1978. Vol. 17, no. 4. P. 1483–1489. URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.17.1483> (date of access: 19.07.2025).

10. Abd Alameer M. F., Khalaf T. H. Computational analysis for electrical breakdown in air due to streamer discharge in rod-to-plane arrangement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 757. P. 012018. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/757/1/012018> (date of access: 19.07.2025).

11. Liu L., Becerra M. Application of the Position-State Separation Method to Simulate Streamer Discharges in Arbitrary Geometries. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45, no. 4. P. 594–602. URL: <https://doi.org/10.1109/tps.2017.2669330> (date of access: 19.07.2025).

12. A study on the streamer simulation using adaptive mesh generation and FEM-FCT / Woong-Gee Min et al. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2001. Vol. 37, no. 5. P. 3141–3144. URL: <https://doi.org/10.1109/20.952562> (date of access: 19.07.2025).

13. COMSOL Multiphysics ® Reference Manual [Електронний ресурс] URL: https://doc.comsol.com/6.2/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf

14. A new one-dimensional moving mesh method applied to the simulation of streamer discharges / D. Bessières et al. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2007. Vol. 40, no. 21. P. 6559–6570. URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/21/016> (date of access: 19.07.2025).

15. Capacitive Discharges. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. Hoboken, NJ, USA, 2005. P. 387–460. URL: <https://doi.org/10.1002/0471724254.ch11> (date of access: 19.07.2025).

16. Liu L., Becerra M. Application of the Position-State Separation Method to Simulate Streamer Discharges in Arbitrary Geometries. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45, no. 4. P. 594–602. URL: <https://doi.org/10.1109/tps.2017.2669330> (date of access: 19.07.2025).

17. Moodley K., Swanson A. Modelling of Streamer Breakdown in a 0.1 cm Air Gap using Positive Polarity DC in Subtropical Conditions. *2022 36th International*

Conference on Lightning Protection (ICLP), Cape Town, South Africa, 2–7 October 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/iclp56858.2022.9942490> (date of access: 19.07.2025).

18. Simulations of positive streamers in air in different electric fields: steady motion of solitary streamer heads and the stability field / H. Francisco et al. *Plasma Sources Science and Technology*. 2021. Vol. 30, no. 11. P. 115007. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac2f76> (date of access: 19.07.2025).

19. Abdulameer M. F., Khalaf T. H. The Simulation of Double Head Streamer Discharge in a 0.5 cm Air Gap. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2754, no. 1. P. 012019. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2754/1/012019> (date of access: 19.07.2025).

References

1. Nijdam, S., Teunissen, J., Ebert, U. (2020). The physics of streamer discharge phenomena. *Plasma Sources Science and Technology*, 29 (10), 103001. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/abaa05> (date of access: 19.07.2025).

2. Uamran, D. A., Khalaf, T. H. (2021). Study for electrical breakdown within dielectric liquids due to streamer discharge in rod-to-plane electrodes configuration. *Materials Today: Proceedings*. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.002> (date of access: 19.07.2025).

3. Zablodskiy, N. et al. (2024). Numerical Modeling and Investigation of Streamer Breakdown in a Coaxial Plasma Torch Based on Townsend Processes. *International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*, Dubai, United Arab Emirates, 27–28 December 2024, 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/iceet65156.2024.10913556>.

4. Iseni, S. et al. (2025). Inception and growth of an electrodeless atmospheric double-headed streamer. *Physical Review E.*, 111(2). URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.111.023202> (date of access: 19.07.2025).

5. Montijn, C., Hundsdorfer, W., Ebert, U. (2006). An adaptive grid refinement strategy for the simulation of negative streamers. *Journal of Computational Physics*, 219 (2), 801–835. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2006.04.017> (date of access: 19.07.2025).

6. Singh, S (2017). Computational framework for studying charge transport in high-voltage gas- insulated systems, Department of Electrical Engineering Chalmers University of Technology.

7. Teunissen, J., Malagón-Romero, A. (2025). Data-driven reduced modeling of streamer discharges in air. *Computer Physics Communications*, 109733. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2025.109733> (date of access: 19.07.2025).

8. Nijdam, S., Teunissen, J., Ebert, U. (2020). The physics of streamer discharge phenomena. *Plasma Sources Science and Technology*, 29 (10), 103001. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/abaa05> (date of access: 19.07.2025).

9. Geary, J. M., Penney, G. W. (1978). Charged-sheath model of cathode-directed streamer propagation. *Physical Review A.*, 17 (4), 1483–1489. URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.17.1483> (date of access: 19.07.2025).

10. Abd Alameer, M. F., Khalaf, T. H. (2020). Computational analysis for electrical breakdown in air due to streamer discharge in rod-to-plane arrangement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 757, 012018. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/757/1/012018> (date of access: 19.07.2025).

11. Liu, L., Becerra, M. (2017). Application of the Position-State Separation Method to Simulate Streamer Discharges in Arbitrary Geometries. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 45 (4), 594–602. URL: <https://doi.org/10.1109/tps.2017.2669330> (date of access: 19.07.2025).

12. Woong-Gee, Min et al. (2001). A study on the streamer simulation using adaptive mesh generation and FEM-FCT. *IEEE Transactions on Magnetics*, 37(5), 3141–3144. URL: <https://doi.org/10.1109/20.952562> (date of access: 19.07.2025).

13. COMSOL Multiphysics ® Reference Manual [Електронний ресурс] URL: https://doc.comsol.com/6.2/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf

14. D. Bessières et al. (2007). A new one-dimensional moving mesh method applied to the simulation of streamer discharges. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40 (21), 6559–6570. URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/21/016> (date of access: 19.07.2025).

15. Capacitive Discharges. (2005). *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. Hoboken, NJ, USA, 2005, 387–460. URL: <https://doi.org/10.1002/0471724254.ch11> (date of access: 19.07.2025).

16. Liu, L., Becerra, M. (2017). Application of the Position-State Separation Method to Simulate Streamer Discharges in Arbitrary Geometries. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 45 (4), 594–602. URL: <https://doi.org/10.1109/tps.2017.2669330> (date of access: 19.07.2025).

17. Moodley, K., Swanson, A. (2022). Modelling of Streamer Breakdown in a 0.1 cm Air Gap using Positive Polarity DC in Subtropical Conditions. *2022 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Cape Town, South Africa, 2–7 October 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/iclp56858.2022.9942490> (date of access: 19.07.2025).

18. Francisco, H. et al. (2021). Simulations of positive streamers in air in different electric fields: steady motion of solitary streamer heads and the stability field. *Plasma Sources Science and Technology*, 30 (11), 115007. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac2f76> (date of access: 19.07.2025).

19. Abdulameer, M. F., Khalaf, T. H. (2024). The Simulation of Double Head Streamer Discharge in a 0.5 cm Air Gap. *Journal of Physics: Conference Series*, 2754 (1), 012019. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2754/1/012019> (date of access: 19.07.2025).

DYNAMICS OF A DOUBLE-HEAD STREAMER IN AIR: NUMERICAL ANALYSIS FOR AN INTER-ELECTRODE GAP OF 0.3 CM

M. Zablodskyi, O. Kovalchuk

Abstract. *The work investigates the dynamics of a double-headed streamer discharge in air at 14 kV using hydrodynamic modeling. Numerical simulations in COMSOL*

Multiphysics (2D axisymmetric geometry, finite element method) revealed significant differences in the development of positive and negative streamers in a 0.3 cm gap: the negative streamer shows high initial velocity (0.4 cm/ns) that rapidly decreases, limiting its maximum propagation distance (0.15 cm), while the positive streamer accelerates over time (up to 0.0378 cm/ns), covering a greater distance (0.14 cm) due to higher electron density (up to $3.34 \times 10^{20} \text{ 1/m}^3$) and more intense electric field ($375 \times 10^5 \text{ V/m}$ vs $119 \times 10^5 \text{ V/m}$ for the negative one). The obtained results confirm the model's ability to accurately reproduce spatiotemporal evolution of streamers, which is crucial for high-voltage device development and breakdown analysis. The study was conducted at 760 Torr with a time step of 0.05 ns over 3.75 ns.

Key words: *double-headed streamer, streamer discharge, numerical simulation, air gap, interelectrode gap, COMSOL Multiphysics, hydrodynamic model, positive streamer, negative streamer, air breakdown, high-voltage discharge*