

УДК 533.9.15

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВ РАЗВЕТВЛЕНИЯ СТРИМЕРНЫХ РАЗРЯДОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ

© 2024 г. Д. В. Вялых¹, В. А. Дехтярь², А. Е. Дубинов^{1,2,*}, И. Л. Львов¹,
С. А. Садовой¹, Л. А. Сенилов¹

¹ Российский – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ),
Саров, Россия,

² Саровский физико-технический институт – филиал Национального
“Московский инженерно-физический институт” (СарФТИ-НИЯУ МИФИ),
Саров, Россия

*E-mail: dubinov-ae@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.05.2024 г.

После доработки 29.06.2024 г.

Принята к публикации 01.07.2024 г.

Экспериментально исследовались стримерные разряды атмосферного давления на поверхности воды при двух различных полярностях напряжения на высоковольтном электроде. Осуществлялись фоторегистрация структуры разрядов и статистический анализ полученных изображений. Получено, что разряды имеют сложную структуру с множеством разветвлений каналов. Найдено, что число разветвлений в разрядах отрицательной полярности в несколько раз превышает число разветвлений положительной полярности. При этом средний угол разветвлений в положительных разрядах больше среднего угла разветвлений в разрядах отрицательной полярности. Разветвлений с углами $>90^\circ$ и точек пересечения разных ветвей друг с другом обнаружено не было.

Ключевые слова: стримерный поверхностный разряд, угол разветвления, статистический анализ

DOI: 10.31857/S0023119324060108 **EDN:** THGXBU

ВВЕДЕНИЕ

Сложно-разветвленные транспортные системы естественного и искусственного происхождения, такие как реки со своими притоками, кровеносная и бронхолегочная дыхательная системы человека, деревья, системы дорог вблизи мегаполисов и т.п., изучаются уже несколько столетий, начиная с Леонардо да Винчи [1]. Яркими примерами таких разветвленных систем являются также молниевые разряды [2] и лабораторные стримерные разряды [3–5]. Часто разветвленную пространственную структуру каналов таких разрядов называют электрическими деревьями [6, 7].

Одна из важных задач исследований разветвленных стримерных разрядов заключается в изучении морфологии разветвления каналов, включающем измерение или вычисление геометрических параметров канальной структуры: статистики длины ветвей [8–10] и углов разветвления [10–13], фрактальных размерностей разветвленной системы [14, 15].

В работах [10–13] экспериментально исследовалась статистика углов разветвления объемных стримерных разрядов путем их визуализации. Было

получено следующее. В работе [10] стримерные разряды в смеси азота и кислорода (0.01%) имели средний угол разветвления $\sim 42^\circ$, а при добавлении кислорода до 20% средний угол разветвления увеличивался до $\sim 57^\circ$. При этом в обоих случаях разветвлений с углами $>90^\circ$ не наблюдалось.

В работе [11] проводились исследования стримерных разрядов в воздухе атмосферного и пониженного давления. Было получено, что средний угол разветвления убывает от 49° до 39° с ростом давления от 220 до 1000 мбар. Разветвления с углами $>90^\circ$ здесь тоже не наблюдались.

В работах [12, 13] регистрировались стримерные разряды в N_2 и CO_2 с добавлением O_2 в диапазоне давлений 10–1000 мбар. В этих работах разветвления с углами $>90^\circ$ наблюдались, при этом в работе [13] средние углы разветвлений были заметно выше (от 66° до 81° при варьировании содержания O_2 от 1 до 5%), а в воздухе средний угол разветвления составил 90° .

Следует отметить, что при исследовании объемных стримерных разрядов возникают некоторые методические сложности: как измерить угол

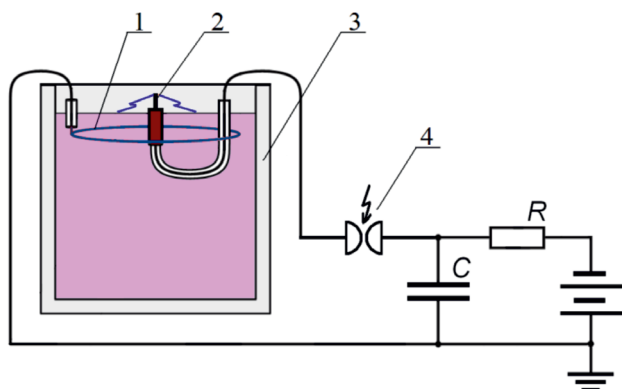


Рис. 1. Схема установки для генерации стримерных разрядов на поверхности воды: 1 – кольцевой заземленный электрод; 2 – штыревой высоковольтный электрод; 3 – диэлектрический сосуд; 4 – разрядник.

разветвления, лежащий в произвольной плоскости относительно регистратора, и как распознать наложение или пересечение проекций разных ветвей друг на друга на плоском изображении и др. Исследователи в работах [12, 13] превосходно справились с этими проблемами с помощью стереоскопической визуализации, используя сразу два синхронизированных регистратора.

При регистрации поверхностных стримерных разрядов указанные выше методические сложности отсутствуют, и поэтому здесь достаточно одного регистратора. Однако статистические исследования углов разветвления поверхностных стримерных разрядов пока нигде ранее не проводились. Таким образом, целью данной работы

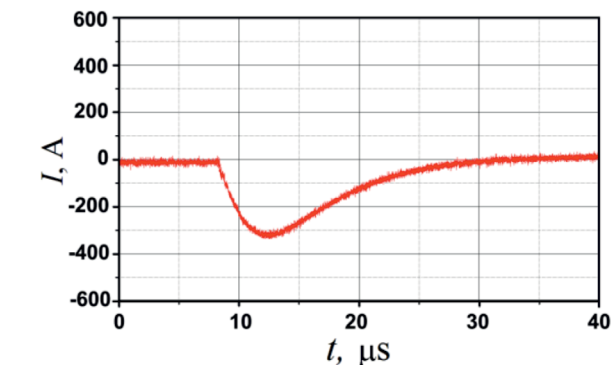
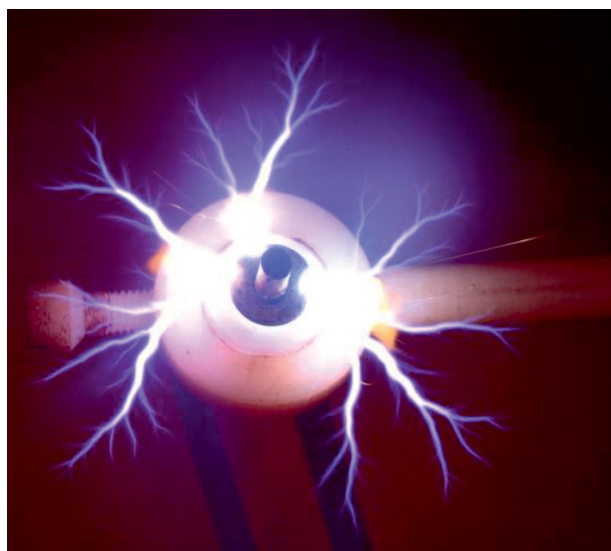


Рис. 2. Осциллограмма тока разряда.

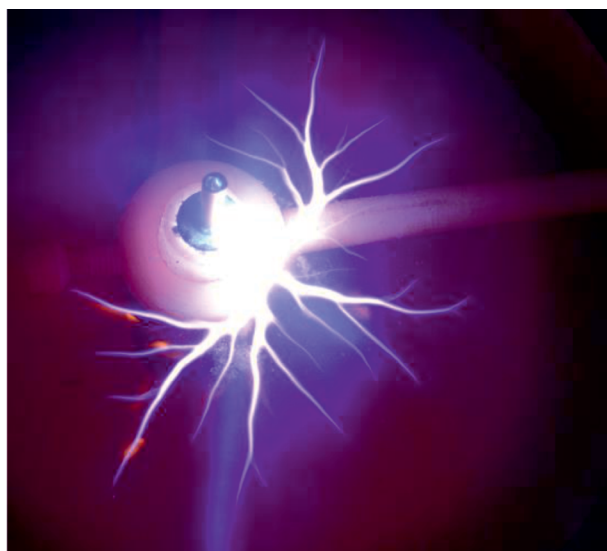
являлись регистрация стримерных разрядов на поверхности жидкости и статистические исследования углов разветвления их каналов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Эксперименты проводились на установке, аналогичной [16] и описанной в работе [17]. Ее схема показана на рис. 1. Основу установки составляет диэлектрический сосуд диаметром 176 мм. На оси камеры располагался высоковольтный штыревой электрод, вблизи боковой стенки сосуда – заземленный кольцевой электрод. Сосуд заполнялся водой таким образом, чтобы кольцевой электрод был погружен в жидкость на глубину 40 мм. При этом высоковольтный электрод оказывался над



(а)



(б)

Рис. 3. Фотоизображения разрядов: (а) при отрицательной полярности напряжения на высоковольтном электроде; (б) при положительной полярности.

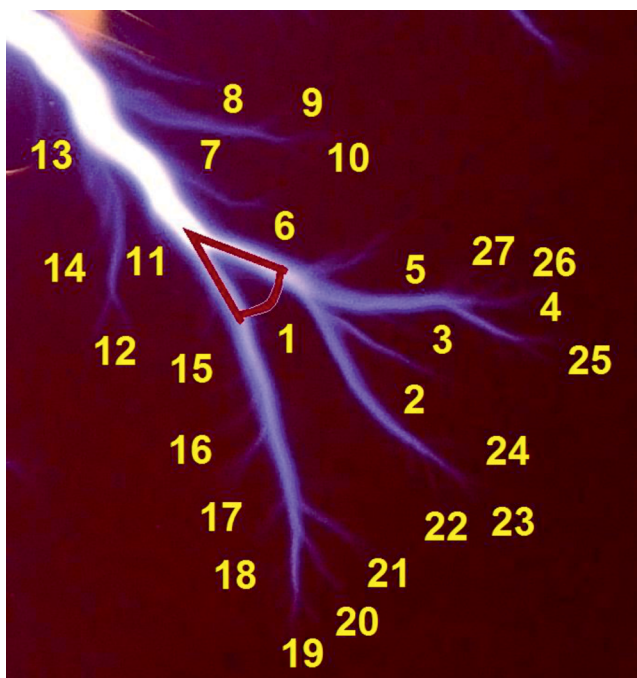


Рис. 4. Фрагмент рис. 3а, показывающий нумерацию точек разветвления и методику измерения угла разветвления.

поверхностью жидкости на высоте 1–3 мм (имелась возможность точной регулировки этой высоты). Электроды через неуправляемый разрядник с номинальным напряжением срабатывания 4.5 кВ подключались к емкостному накопителю энергии, имеющему емкость 0.94 мкФ. Емкостной накопитель, в свою очередь, подключался к источнику зарядки.

После окончания зарядки накопителя, когда напряжение достигало напряжения срабатывания

разрядника, на поверхности жидкости развивался импульсный стримерный разряд, который имел разветвленную структуру радиального типа. На рис. 2 показана типичная осциллограмма тока разряда.

Регистрация изображений разряда производилась установленной сверху фотокамерой Sony DSC-H50 в ждущем режиме в условиях затемнения помещения. Для улучшения контрастности поверхностных разрядов, согласно рекомендациям [18, 19], вода подкрашивалась KMnO_4 .

Наилучшие цифровые фотоизображения получались при установке следующих параметров съемки: расстояние от объектива до штыревого электрода – 100 мм, фокусное расстояние – 16 мм, разрешение 72 ppi, размер изображения 3456×2592 pixels, выдержка – 5 с, глубина цвета – 24.

Эксперименты проводились в воздухе при нормальных климатических условиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Были получено множество изображений разряда как при положительной, так и при отрицательной полярности напряжения на высоковольтном электроде. Примеры фотоизображений разряда показаны на рис. 3а, б, полученные при отрицательной и положительной полярностях импульсов на высоковольтном электроде соответственно. Заметно, что разряды при отрицательной полярности импульсов являются более разветвленными, чем при положительной полярности.

Полученные изображения позволяют измерить углы разветвления в узлах, которых на изображениях разрядов положительной полярности несколько

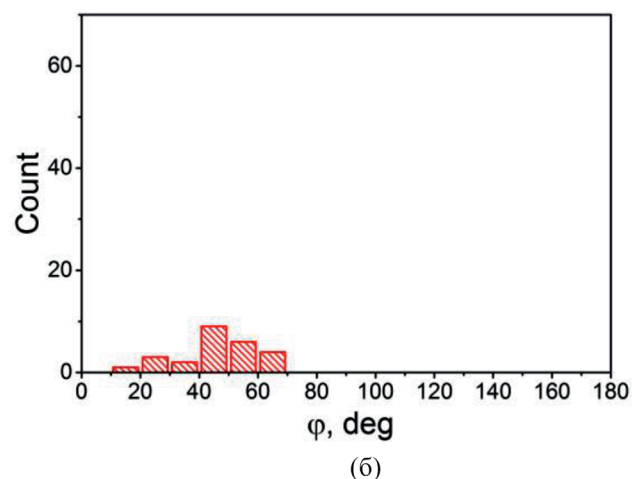
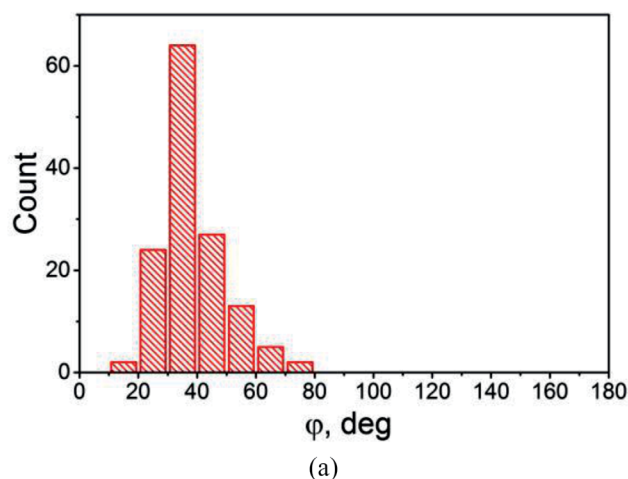


Рис. 5. Гистограммы, показывающие количество точек разветвления, имеющих угол из соответствующего диапазона: (а) при отрицательной полярности напряжения на высоковольтном электроде; (б) при положительной полярности.

десятков, а на импульсах отрицательной полярности — до полутора сотни. На рис. 4 показан пример оцифровки ветвей узлов одной из ветвей разряда, показанного на рис. 3а, и один из измеренных углов.

Приведем результаты обработки изображений рис. 3а, 3б. Для изображения, представленного на рис. 3а, число разветвлений составляет $N = 137$, а средний угол разветвления $\varphi = 38.6 \pm 10.6$, а для изображения на рис. 3б число разветвлений составляет всего $N = 25$, а средний угол разветвления $\varphi = 47.0 \pm 12.7$. Статистический анализ двух комплектов по 5 изображений стримерных разрядов разных полярностей дал среднее число разветвлений $\langle N_+ \rangle = 26.5 \pm 2.5$ и $\langle N_- \rangle = 137.0 \pm 6.5$ для положительных и отрицательных полярностей высокого напряжения, соответственно. Средние углы разветвлений составили $\langle \varphi_+ \rangle = 48.6^\circ$ и $\langle \varphi_- \rangle = 41.5^\circ$.

Отметим, что разветвлений с тупыми углами $>90^\circ$ в поверхностных стримерных разрядах обеих полярностей зарегистрировано не было. Пересечения разных ветвей друг с другом также отсутствуют.

В итоге получено, что стримерные разряды вдоль поверхности воды в воздух атмосферного давления имеют сложную структуру с множеством разветвлений каналов. Число разветвлений в разрядах отрицательной полярности в несколько раз превышает число разветвлений в разрядах положительной полярности. При этом средний угол разветвлений в положительных разрядах примерно на 7° больше среднего угла разветвлений в разрядах отрицательной полярности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследовались стримерные разряды атмосферного давления вдоль поверхности воды при двух различных полярностях напряжения на высоковольтном электроде. Осуществлялись цифровая фоторегистрация многоканальной радиальной структуры разрядов и статистический анализ полученных изображений. Получено, что разряды имеют сложную структуру с множеством разветвлений каналов. Найдено, что число разветвлений в разрядах отрицательной полярности в несколько раз превышает число разветвлений в разрядах положительной полярности. При этом средний угол разветвлений в положительных разрядах при-

мерно на 7° больше среднего угла разветвлений в разрядах отрицательной полярности. Разветвлений с тупыми углами $>90^\circ$ и точек пересечения разных ветвей друг с другом обнаружено не было.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Richter J.P.* // The Notebooks of Leonardo da Vinci (1452–1519). NY: Dover, 1970.
2. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* // Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001.
3. *van Veldhuizen E.M., Rutgers W.R.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. V. 35. № 17. P. 2169.
4. *Pancheshnyi S.* // Plasma Sources Sci. Techn. 2005. V. 14. № 4. P. 645.
5. *Dubinova A., Trienekens D., Ebert U., Nijdam S., Christen T.* // Plasma Sources Sci. Techn. 2016. V. 25. № 5. P. 055021.
6. *Chalashkanov N.M., Dodd S.J., Dissado L.A., Fothergill J.C.* // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2016. V. 23. № 6. P. 3256.
7. *Du B.X., Xue J.S., Zhang M.M.* // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2017. V. 24. № 1. P. 359.
8. *Heijmans L.C.J., Nijdam S., van Veldhuizen E.M., Ebert U.* // Europhys. Lett. 2013. V. 103. № 2. P. 25002.
9. *Xie P., Jiang Z., Liu W., Shuai Y.* // Energy Rep. 2023. V. 9. Supp. № 10. P. 406.
10. *Chen S., Wang F., Sun Q., Zeng R.* // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2018. V. 25. № 3. P. 1128.
11. *Nijdam S., Moerman J.S., Briels T.M.P., van Veldhuizen E.M., Ebert U.* // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 92. № 10. P. 101502.
12. *Dijcks S., van der Leege M., Nijdam S.* // Plasma Sources Sci. Techn. 2023. V. 32. № 4. P. 045004.
13. *Guo Y., Nijdam S.* // Plasma Sources Sci. Techn. 2024. V. 33. № 4. P. 045006.
14. *Ficker T.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1999. V. 32. № 3. P. 219.
15. *Тренькин А.А.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. № 7. С. 13.
16. *Белощеев В.П.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. № 4. С. 35.
17. *Dubinov A.E., L'vov I.L., Sadovoy S.A., Senilov L.A., Vyalykh D.V.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41. № 2. P. 380.
18. *Pearson R.S.* // J. Chem. Educ. 1988. V. 65. № 5. P. 451.
19. *Dekhtyar V.A., Dubinov A.E.* // Sci. Visual. 2023. V. 15. № 1. P. 1.

STATISTICAL ANALYSIS OF BRANCHING ANGLES OF STREAMER DISCHARGES ON THE LIQUID SURFACE

**D. V. Vyalukh^a, V. A. Dekhtyar^a, A. E. Dubinov^{a, b, *}, I. L. Lvov^a,
S. A. Sadovoy^a, L. A. Senilov^a**

^a*Russian Federal Nuclear Center All-Russian Research Institute of Experimental Physics,
Sarov, Russia*

^b*Sarov Institute of Physics and Technology, Sarov, Russia*

^{*}*E-mail: dubinov-ae@yandex.ru*

The experimental investigation of atmospheric pressure streamer discharges on the water surface at two different polarities of voltage at the high-voltage electrode revealed several noteworthy findings. The discharge structure was photoregistered and subjected to statistical analysis. The results demonstrated that the discharges possess a complex structure comprising numerous branching channels. It was determined that the number of branching channels in discharges of negative polarity is approximately six times higher than the number of branching channels of positive polarity. Conversely, the mean branching angle of positive discharges is greater than that of negative polarity discharges. No branching angles exceeding 90° were observed, nor were any instances of intersection between different branches identified.

Keywords: streamer surface discharge, branching angle, statistical analysis

REFERENCES

1. *Richter J.P.* // The Notebooks of Leonardo da Vinci (1452–1519). NY: Dover, 1970.
2. *Bazelyan E.M., Raiser Yu.P.* // Physics of Lightning and Lightning Protection. M.: Fizmatlit, 2001.
3. *van Veldhuizen E.M., Rutgers W.R.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. V. 35. № 17. P. 2169.
4. *Pancheshnyi S.* // Plasma Sources Sci. Techn. 2005. V. 14. № 4. P. 645.
5. *Dubinova A., Trienekens D., Ebert U., Nijdam S., Christen T.* // Plasma Sources Sci. Techn. 2016. V. 25. № 5. P. 055021.
6. *Chalashkanov N.M., Dodd S.J., Dissado L.A., Fothergill J.C.* // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2016. V. 23. № 6. P. 3256.
7. *Du B.X., Xue J.S., Zhang M.M.* // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2017. V. 24. № 1. P. 359.
8. *Heijmans L.C.J., Nijdam S., van Veldhuizen E.M., Ebert U.* // Europhys. Lett. 2013. V. 103. № 2. P. 25002.
9. *Xie P., Jiang Z., Liu W., Shuai Y.* // Energy Rep. 2023. V. 9. Supp. № 10. P. 406.
10. *Chen S., Wang F., Sun Q., Zeng R.* // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2018. V. 25. № 3. P. 1128.
11. *Nijdam S., Moerman J.S., Briels T.M.P., van Veldhuizen E.M., Ebert U.* // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 92. № 10. P. 101502.
12. *Dijcks S., van der Leege M., Nijdam S.* // Plasma Sources Sci. Techn. 2023. V. 32. № 4. P. 045004.
13. *Guo Y., Nijdam S.* // Plasma Sources Sci. Techn. 2024. V. 33. № 4. P. 045006.
14. *Ficker T.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1999. V. 32. № 3. P. 219.
15. *Trenkin A.A.* // Letters to Technical Physics. 2010. V. 36. № 7. P. 13.
16. *Belosheev V.P.* // Technical Physics. 1999. V. 69. № 4. P. 35.
17. *Dubinova A.E., Lvov I.L., Sadovoy S.A., Senilov L.A., Vyalykh D.V.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41. № 2. P. 380.
18. *Pearson R.S.* // J. Chem. Educ. 1988. V. 65. № 5. P. 451.
19. *Dekhtyar V.A., Dubinov A.E.* // Sci. Visual. 2023. V. 15. № 1. P. 1.