

УДК 551.594

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-53-59

Феноменология электрических разрядов, возникающих между отрицательно заряженным облаком водного аэрозоля и землей

Н.Ю. Лысов, А.В. Орлов, А.Г. Темников, Л.Л. Черненский

Исследование электрических разрядов, создаваемых в электрическом поле заряженных аэрозольных облаков, позволяет более полно понять процесс возникновения молнии в грозовых облаках. С этой целью создана экспериментальная установка, позволяющая создавать заряженные аэрозольные облака отрицательной полярности. Заряженное аэрозольное облако создает напряженность электрического поля, достаточную для возникновения электрических разрядов между облаком и землей.

Дано краткое описание экспериментальной установки для получения искусственно созданного заряженного аэрозольного облака с комплексом измерительных приборов, выполняющих регистрацию электрических и оптических сигналов разрядов, а также фотографирование самих разрядов. В ходе экспериментов накоплена база данных, в которую вошли осциллограммы импульсов тока разрядов, полученных с помощью цифровых осциллографов, осциллограммы сигналов оптических датчиков, регистрирующих развитие разрядов в пространстве и во времени, фотографии разрядов. Собранная информация позволяет классифицировать разряды, возникающие между искусственно созданными заряженными аэрозольными облаками отрицательной полярности и землей, по виду и параметрам.

Анализ экспериментальных данных показал, что между заряженным аэрозольным облаком и землей могут возникать как восходящие, так и нисходящие разряды, что характерно для природных молний. Изучены фотографии наиболее характерных типов электрических разрядов, наблюдаемых в экспериментах, и созданы простые модели, поясняющие развитие этих разрядов.

Ключевые слова: электрический разряд, стример, молния, облако заряженного аэрозоля, простая модель развития разряда, экспериментальная установка.

Для цитирования: Лысов Н.Ю., Орлов А.В., Темников А.Г., Черненский Л.Л. Феноменология электрических разрядов, возникающих между отрицательно заряженным облаком водного аэрозоля и землей // Вестник МЭИ. 2020. № 6. С. 53—59. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-53-59.

The Phenomenology of Electric Discharges Generated between a Negatively Charged Water Aerosol Cloud and Earth

N.Yu. Lysov, A.V. Orlov, A.G. Temnikov, L.L. Chernensky

Studies of electrical discharges generated in the electric field of charged aerosol clouds make it possible to obtain better understanding of how lightning occurs in thunderclouds. For this purpose, an experimental setup was developed, which allows charged aerosol clouds of negative polarity to be produced. A charged aerosol cloud creates electric field strength sufficient to generate electrical discharges between this cloud and the earth. The experimental setup for obtaining an artificially produced charged aerosol cloud is briefly described. The experimental setup is equipped with a set of measuring instruments for recording the electrical and optical signals of discharges and for photographing the discharges themselves. A database has been accumulated in the course of experiments, which includes the waveforms of discharge current pulses recorded using digital oscilloscopes, the waveforms of signals from optical sensors recording the development of discharges in space and time, and the snapshots of discharges. By using the accumulated information it is possible to classify discharges that occur between artificially produced charged aerosol clouds of negative polarity and the earth by type and parameters. An analysis of the experimental data has shown that both upward and downward discharges can occur between a charged aerosol cloud and the earth, which is typical for natural lightning phenomena. The snapshots of the most characteristic types of electric discharges observed in experiments and simple models explaining the development of these discharges are studied.

Key words: electric discharge, streamer, lightning, charged aerosol cloud, simple discharge development model, experimental setup.

For citation: Lysov N.Yu., Orlov A.V., Temnikov A.G., Chernensky L.L. The Phenomenology of Electric Discharges Generated between a Negatively Charged Water Aerosol Cloud and Earth. Bulletin of MPEI. 2020;6:53—59. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-53-59.

Введение

Интерес к изучению электрических разрядов, зарождающихся в атмосфере, возник давно. Процесс исследования начала и развития природной молнии достаточно сложен, поскольку в естественных условиях трудно и опасно приближаться к грозовому облаку и вести наблюдения и измерения физических параметров. Одно из направлений в изучении электрических разрядов связано с попытками создания в лабораторных условиях грозового облака в миниатю-

ре и получения электрических разрядов в его электрическом поле.

Зарубежными и российскими учеными предпринимались попытки разработки установки на основе генераторов заряженного аэрозоля и моделирования грозового облака в лабораторных условиях. В качестве примера можно привести публикации японских ученых, создавших свои генераторы заряженного аэрозоля [1 — 3]. В качестве основы для аэрозоля использован порошок из морских ракушек, который в потоке

воздуха приобретал униполярный электрический заряд в поле коронного разряда. Воздух транспортировал заряженный порошок и формировал заряженное аэрозольное облако. Однако были получены слабые электрические разряды, что не позволило смоделировать физические процессы, происходящие в грозовом облаке. Анализ современных источников показал отсутствие какой-либо информации о подобных исследованиях и их результатах.

На кафедре Техники и электрофизики высоких напряжений (ТЭВН) МЭИ создана экспериментальная установка, в которой использован генератор заряженного водного аэрозоля. Она лишена недостатков зарубежных установок для создания заряженных аэрозольных образований [4 — 7]. В последние 30 лет кафедра проводит исследования электрических разрядов, создаваемых заряженным аэрозольным облаком. Работа с заряженными аэрозольными облаками позволяет изучать разрядные явления, возникающие внутри и вблизи заряженного облака [8 — 13]. Эксперименты помогли создать базу данных, классифицирующую разряды по виду и параметрам. Выделено несколько типов электрических разрядов, дано их описание, характерные параметры и модели.

Экспериментальная установка

На кафедре ТЭВН спроектирована и изготовлена установка, позволяющая проводить экспериментальные исследования электрических разрядов, возникающих в электрическом поле заряженного аэрозольного облака. Это позволило максимально приблизить измерительную аппаратуру к миниатюрному грозовому облаку и получить необходимую информацию.

В установке использован генератор водяного пара, создающий аэрозольное облако. Пар проходит через сопло в свободное пространство, конденсируется и формирует аэрозольное облако. Внутри сопла генерируется униполярный коронный разряд, через который проходит пар. В свободном пространстве установки формируется отрицательно заряженное аэрозольное облако.

Плотность объемного заряда отрицательной полярности достигает $5 \cdot 10^{-7}$ Кл/м³, что создает напряженность электрического поля порядка 10 кВ/см на поверхности земли, а на границе объемного заряда облака эта величина достигает 20 кВ/см. При таких условиях в воздухе между заряженным аэрозольным облаком и землей возникают электрические разряды, сопровождающиеся световыми вспышками и характерным звуком.

Накопленная база экспериментальных данных позволяет выполнить анализ зарегистрированных событий и сгруппировать их по общим признакам и характеристикам.

На рисунке 1 изображена схема экспериментальной установки.

Заряженное аэрозольное облако 1 формирует электрический разряд 2 между облаком и сферическим электродом 3, установленным на заземленной проводящей плоскости 4 и соединенным с мало индуктивным шунтом $R_{ш}$.

Ток разряда, протекающий по шунту, создает падение напряжения, форма которого регистрируется четырехканальным цифровым запоминающим осциллографом 5 типа Tektronix DPO 7254. Установка оснащена четырьмя оптическими датчиками 6 — 9 на основе фотоэлектронных умножителей. Сигнал от оптических датчиков поступает на второй четырехканальный запоминающий осциллограф 10 типа Tektronix TDS 3054 D. Оба осциллографа имеют общую синхронизацию по времени и связаны с ЭВМ для накопления экспериментальных данных. Светлый образ электрического разряда фотографируется цифровой фотокамерой 11 типа Panasonic Lumix 370. Полученные данные обрабатываются и анализируются после эксперимента.

На рисунке 2 показана схема измерения тока разряда, протекающего по сопротивлению шунта $R_{ш} = 1$ Ом, создавая падение напряжения на нем. Таким образом, напряжение сигнала идет на вход цифрового запоминающего осциллографа посредством коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом. Резисторы

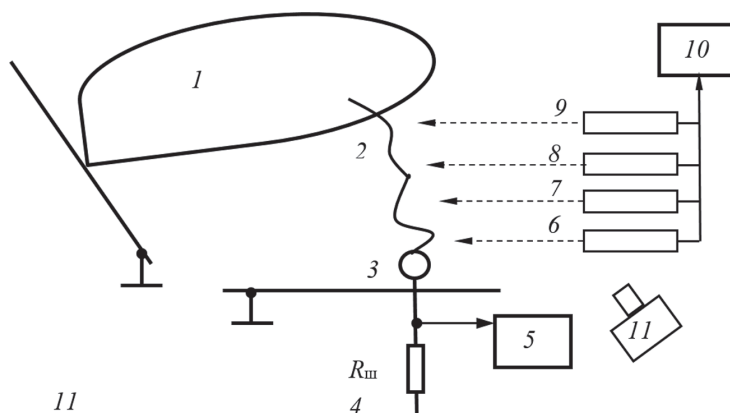


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — заряженное аэрозольное облако; 2 — электрический разряд; 3 — сферический электрод; 4 — заземленная проводящая плоскость; 5, 10 — четырехканальные цифровые запоминающие осциллографы Tektronix DPO 7254 и Tektronix TDS 3054 D; 6 — 9 — фотоэлектронные умножители; 11 — цифровая фотокамера Panasonic Lumix 370

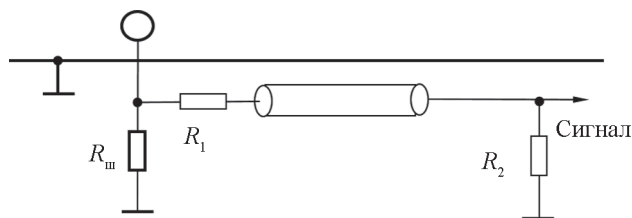


Рис. 2. Схема измерения тока разряда

R_1 и R_2 (по 50 Ом каждый) установлены для согласования во избежание отражений в сигнальном кабеле. Таким образом, на вход осциллографа поступает сигнал, ослабленный в два раза. Это решение позволяет защитить входные цепи осциллографа от нежелательной перегрузки.

Система оптических датчиков состоит из четырех вертикально расположенных датчиков с щелевыми дифрактами, позволяющими выделить узкую (3 — 5 см шириной) горизонтальную область под аэрозольным облаком и регистрировать возникновение разряда в выделенной области. Каждый датчик нацелен на свою на определенной высоте выделенную в вертикальной плоскости область. Анализ сигнала от оптических датчиков позволяет определить направление развития разряда и оценить скорость его распространения. На рис. 3 представлены сигналы, зарегистрированные цифровым запоминающим осциллографом.

По каналу 1 записан ток разряда, а по каналам 2 — 4 — сигналы от трех оптических датчиков. Из представленных осциллограмм видно, что начало каждого импульса имеет сдвиг по времени. Сигналы соответствуют датчикам, расположенным в следующем порядке: канал 4 — самый нижний, канал 3 — средний, канал 2 — верхний датчики. Разряд развивался снизу вверх, поскольку первым световое излучение разряда зарегистрировал нижний датчик, а затем по-

следовательно средний и верхний. Таким образом, зная задержку по времени между сигналами и расстояние по вертикали между зонами чувствительности, можно оценить скорость распространения разряда, составившую от 0,3 до 3,8 см/нс [5].

Анализ экспериментальных результатов

Анализ полученных фотографий помог выделить несколько типов разрядов. Первый тип — восходящие разряды (рис. 4), идущие от заземленного электрода к заряженному облаку. Второй тип — нисходящий яркий разряд (рис. 5), идущий от заряженного облака к земле. Нисходящие разряды более яркие, чем восходящие, и их траектория более прямолинейная.

На рисунке 6 дана осциллограмма тока, характерная для разрядов первого и второго типов. Амплитуда импульса тока достигает 100 А. Как правило, амплитуды нисходящих разрядов меньше восходящих. Длительности импульсов — от 100 до 400 нс, фронта — от 1 до 5 нс.

Третий тип разрядов — разряды, состоящие из двух частей: восходящей и нисходящей. На рисунке 7 продемонстрирован разряд, состоящий из указанных двух частей, встретившихся лоб в лоб. Разновидностью такого типа разрядов считается разряд, изображенный на рис. 8. В данном случае замыкание частей разряда происходит через воздушный промежуток посредством стримерной короны.

Модель, поясняющая развитие указанного типа разряда, показана на рис. 9. Синим цветом обозначен отрицательный заряд, красным — положительный. Развитие идет встречно по одной силовой линии.

Разновидностью третьего типа разряда является разряд на рис. 10.

Восходящий и нисходящий разряды развиваются самостоятельно навстречу друг другу, но по своим несовпадающим силовым линиям фронта от 1 до 5 нс.

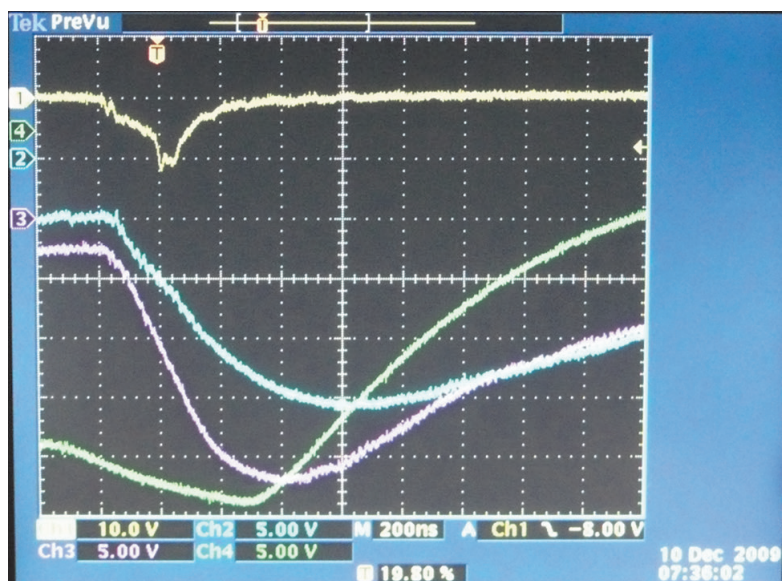


Рис. 3. Осциллограммы сигналов

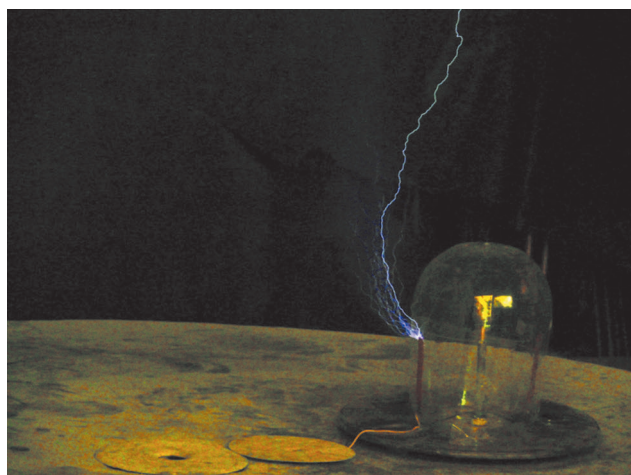


Рис. 4. Восходящий разряд

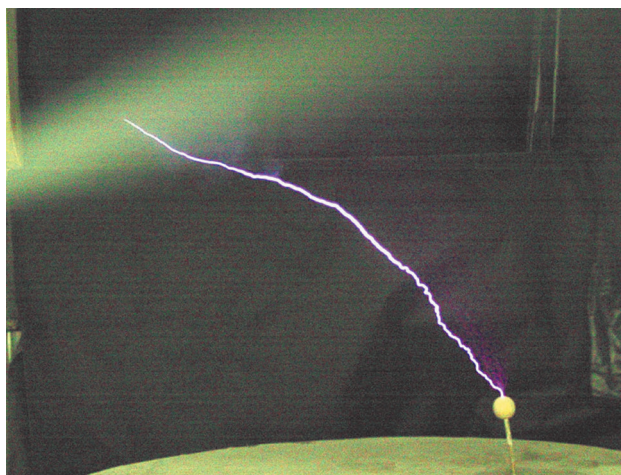


Рис. 7. Встреча восходящей и нисходящей частей лоб в лоб

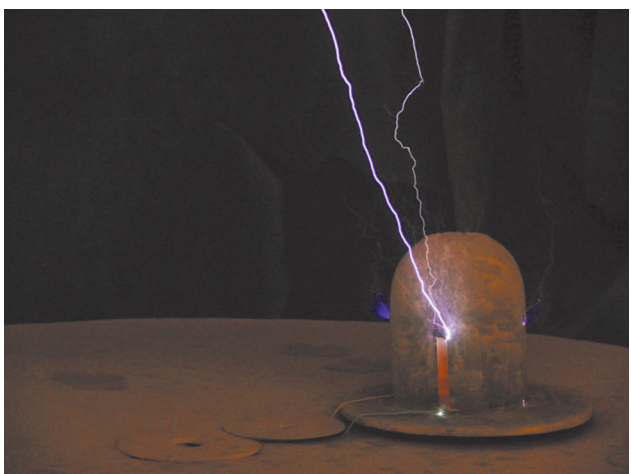


Рис. 5. Нисходящий разряд

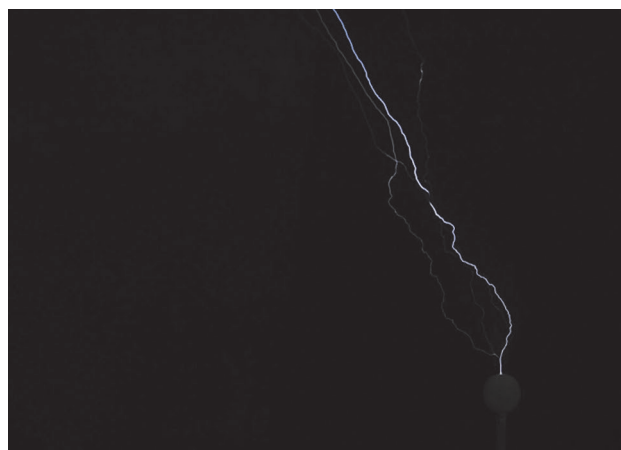


Рис. 8. Замыкание восходящей и нисходящей частей через стримерную корону

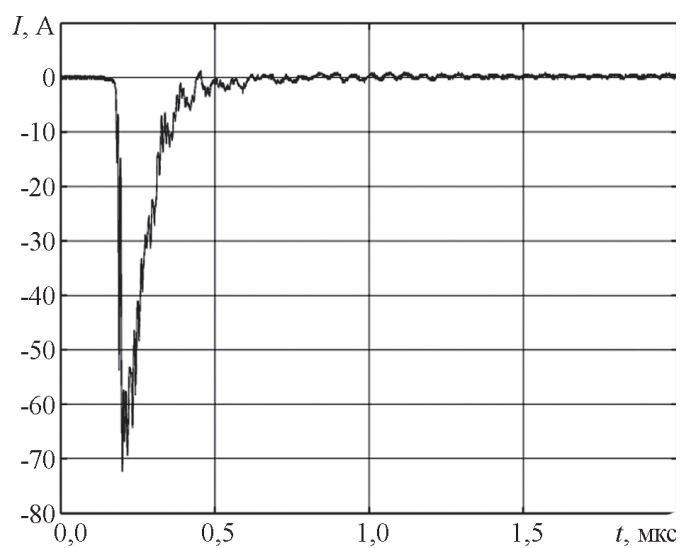


Рис. 6. Осциллограмма тока разрядов первого и второго типов

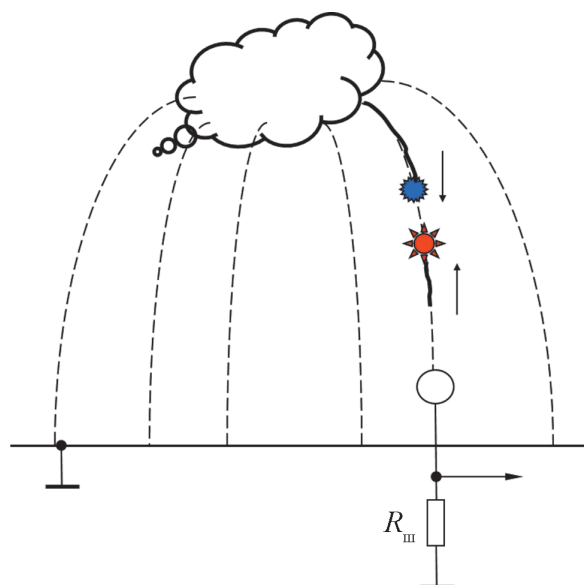


Рис. 9. Модель развития разряда третьего типа

При некотором расстоянии друг от друга происходит пробой воздушного промежутка и замыкание частей разряда: возникает своеобразная ступенька (см. рис. 10). Пробой может носить как стримерный характер (левый разряд), так и характер стримерной короны (правый разряд), что удачно зафиксировано на фотоснимке рис. 10.

Еще одна разновидность третьего типа разрядов — разряд, в котором пробой воздушного промежутка между восходящим и нисходящим разрядами происходит не между их крайними точками, а значительно дальше. Они как бы проскакивают место встречи (рис. 11, 12.). Его модель продемонстрирована на рис. 13.

Четвертый тип — разряд, состоящий из трех участков (рис. 14). В нем присутствуют восходящий и нисходящий разряды и средняя часть, развившаяся из ядра, появляющегося в середине промежутка между заряженным облаком и землей. Восходящая и нисходящая части замкнуты на среднюю часть — ядро. Из рисунка 14 следует, что средняя часть имеет две ступеньки, замыкающие концы ядра на восходящий и нисходящий разряды. Модель, поясняющая формирование этого разряда, дана на рис. 15.

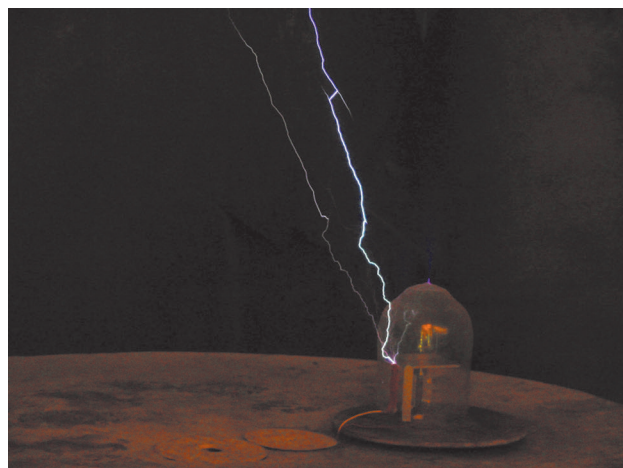


Рис. 12. Разряд со смещением и с проскоком

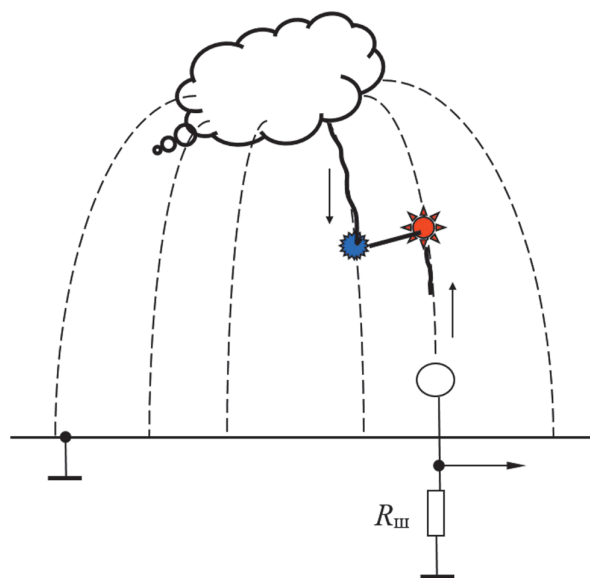


Рис. 13. Модель разряда третьего типа со смещением

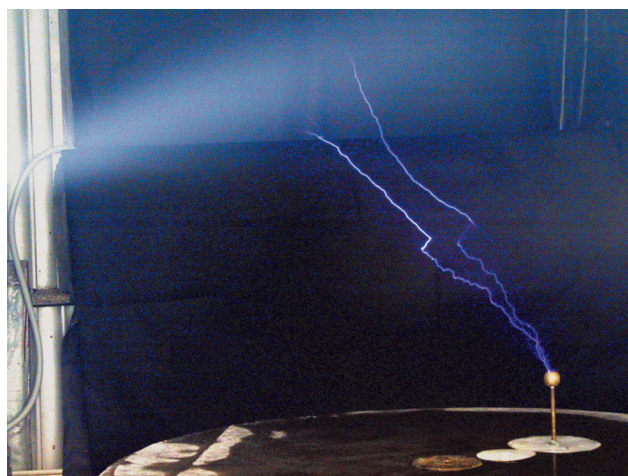


Рис. 10. Электрические разряды со ступенькой

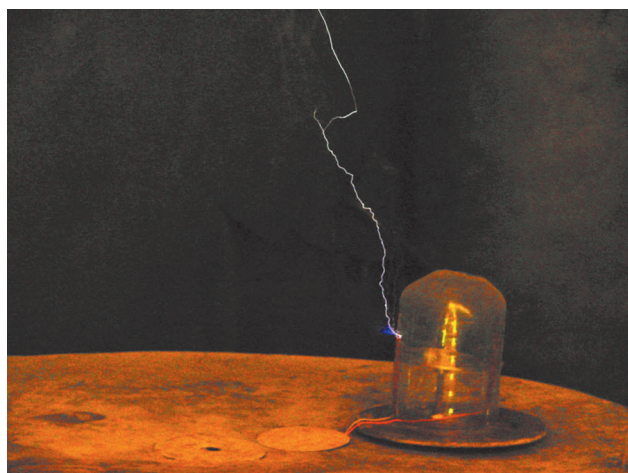


Рис. 11. Разряд со смещением и с проскоком

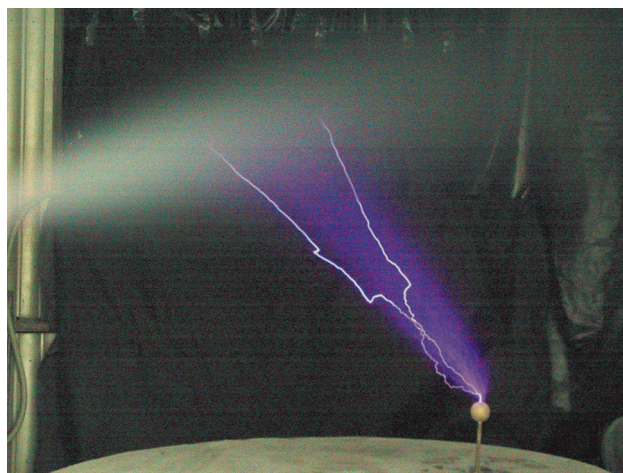


Рис. 14. Четвертый тип разряда — разряд с ядром

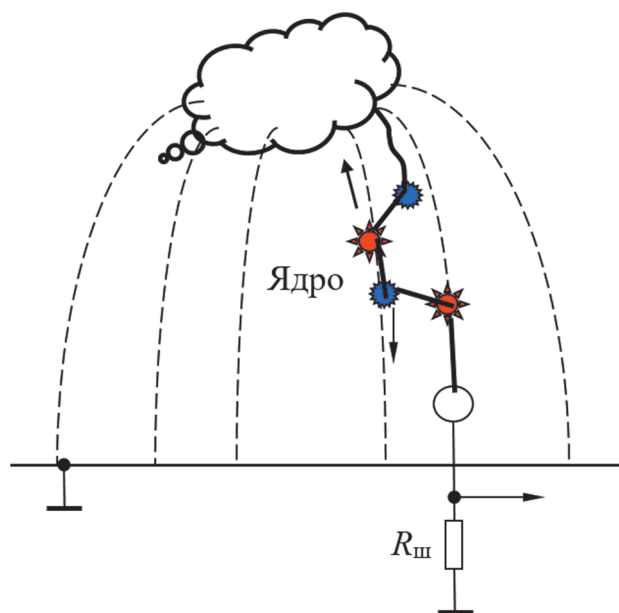


Рис. 15. Модель разряда четвертого типа

Редким событием является разряд, содержащий два ядра (рис. 16).

Выводы

На кафедре ТЭВН НИУ «МЭИ» спроектирована и изготовлена установка для создания искусственных за-

Литература

1. Sigimoto T., Tanaka S., Higashiyama Y., Asano K. Formation of a Charged Droplets Cloud and Corona Discharge Between the Cloud and a Grounded Electrode // IEEE Trans. Industry Appl. 1999. V. 35. No. 1. Pp. 225—230.
2. Sigimoto T., Doi Shin-Ichiro, Takahashi M., Higashiyama Y. Distribution of Electric Field Strength Around a Large scalt Charged Particle Cloud // IEEE Trans. Industry Appl. 2001. V. 37. No. 3. Pp. 724—729.
3. Higashiyama Y., Migita S., Toki K., Sigimoto T. Electrical Discharge Occurring between Negatively Charged Particle Cloud and Grounded Sphere Electrode // J. Physics: Conf. Series. 2008. V. 142. Pp. 012002—021007.
4. Верещагин И.П. и др. Электрический разряд в заряженном аэрозоле // Известия АН СССР. Серия «Энергетика и транспорт». 1989. № 4. С. 100—106.
5. Анцупов К.В. и др. Исследование искровых разрядов из облака заряженных аэрозольных частиц // Известия АН СССР. Серия «Энергетика и транспорт». 1990. № 4. С. 158—162.
6. Анцупов К.В. и др. Методы получения заряженных аэрозольных образований и их использование // Известия АН СССР. Серия «Энергетика и транспорт». 1990. № 5. С. 78—90.
7. Makalsky L.M., Orlov A.V., Temnikov A.G. Possible Mechanism of Lightning Strokes to Extra-high Voltage Power Transmission Lines // J Electrostatics. 1996. V. 37. Pp. 249—260.

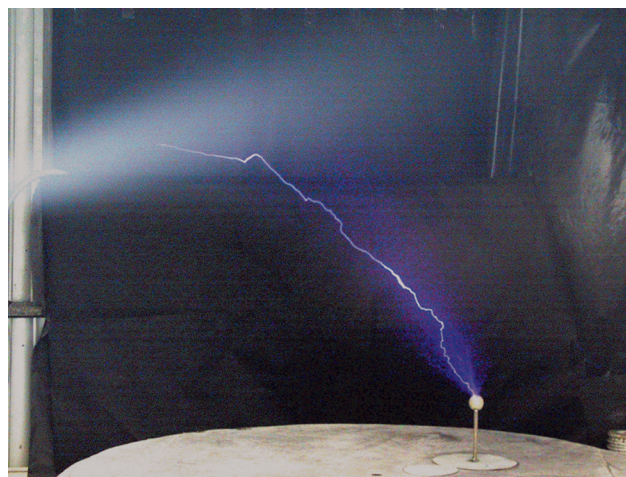


Рис. 16. Разряд с двумя ядрами

ряженных облаков водного аэрозоля. Заряженное облако отрицательной полярности позволяет генерировать электрические разряды между облаком и землей.

Анализ статических фотографий выявил несколько типов электрических разрядов, а анализ осциллограмм сигналов оптических датчиков показал наличие восходящих и нисходящих частей разрядов.

Доказано возникновение между заряженным аэрозольным облаком и землей ядра, из которого развиваются нисходящий и восходящий разряды.

References

1. Sigimoto T., Tanaka S., Higashiyama Y., Asano K. Formation of a Charged Droplets Cloud and Corona Discharge Between the Cloud and a Grounded Electrode. IEEE Trans. Industry Appl. 1999;35;1:225—230.
2. Sigimoto T., Doi Shin-Ichiro, Takahashi M., Higashiyama Y. Distribution of Electric Field Strength Around a Large scalt Charged Particle Cloud. IEEE Trans. Industry Appl. 2001;37;3:724—729.
3. Higashiyama Y., Migita S., Toki K., Sigimoto T. Electrical Discharge Occurring between Negatively Charged Particle Cloud and Grounded Sphere Electrode. J. Physics: Conf. Series. 2008;142:012002—021007.
4. Vereshchagin I.P. i dr. Elektricheskiy Razryad v Zaryazhennom Aerozole. Izvestiya AN SSSR. Seriya «Energetika i Transport». 1989;4:100—106. (in Russian).
5. Antsupov K.V. i dr. Issledovanie Iskrovykh Razryadov iz Oblaka Zaryazhennykh Aerozol'nykh Chastits. Izvestiya AN SSSR. Seriya «Energetika i Transport». 1990;4:158—162. (in Russian).
6. Antsupov K.V. i dr. Metody Polucheniya Zaryazhennykh Aerozol'nykh Obrazovaniy i Ikh Ispol'zovanie. Izvestiya AN SSSR. Seriya «Energetika i Transport». 1990;5:78—90. (in Russian).
7. Makalsky L.M., Orlov A.V., Temnikov A.G. Possible Mechanism of Lightning Strokes to Extra-high Voltage Power Transmission Lines. J Electrostatics. 1996; 37:249—260.

8. **Temnikov A.G.** Using of Artificial Clouds of Charged Water Aerosol for Investigations of Physics of Lightning and Lightning Protection // Proc. Intern. Conf. Lightning Protection. Vienna, 2012.

9. **Temnikov A.G., Zhuravkova D.S., Orlov A.V., Lysov N.Y.** Outlook Research of Application of Model Hydrometeor Arrays for Artificial Initiation of Lightning and Thundercloud Charge Reduction // IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng. 2019. V. 698. P. 044039.

10. **Темников А.Г. и др.** Особенности искусственного инициирования молнии «облако-земля» и стимулирования разрядки грозового облака группами модельных гидрометеоров // Известия РАН. Серия «Энергетика». 2019. № 2. С. 90—105.

11. **Темников А.Г. и др.** Исследование перспектив применения групп модельных гидрометеоров для искусственного инициирования молнии // Труды VIII Всерос. конф. по атмосферному электричеству. Нальчик, 2019. С. 176—178.

12. **Темников А.Г. и др.** Исследование влияния групп модельных гидрометеоров на форму и характеристики импульсов электромагнитного излучения, регистрируемого вблизи искусственных грозовых ячеек // Там же. С. 178—180.

13. **Temnikov A.G. et al.** Investigations of Peculiarities of Simulation of the Processes of Initiation of Downward and Intracloud Lightning Using Artificial Thunderstorm Cells // Proc. 11th Asia-Pacific Intern. Conf. Lightning. 2019. Pp. 279—285.

8. **Temnikov A.G.** Using of Artificial Clouds of Charged Water Aerosol for Investigations of Physics of Lightning and Lightning Protection. Proc. Intern. Conf. Lightning Protection. Vienna, 2012.

9. **Temnikov A.G., Zhuravkova D.S., Orlov A.V., Lysov N.Y.** Outlook Research of Application of Model Hydrometeor Arrays for Artificial Initiation of Lightning and Thundercloud Charge Reduction. IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng. 2019;698:044039.

10. **Темников А.Г. и др.** Osobennosti Iskusstvennogo Initsirovaniya Molnii «Oblako-Zemlya» i Stimulirovaniya Razryadki Grozovogo Oblaka Gruppami Model'nykh Gidrometeorov. Izvestiya RAN. Seriya «Energetika». 2019;2:90—105. (in Russian).

11. **Темников А.Г. и др.** Issledovanie Perspektiv Primeneniya Grupp Model'nykh Gidrometeorov dlya Iskusstvennogo Initsirovaniya Molnii. Trudy VIII Vseros. Konf. po Atmosfernomu Elektrichestvu. Nal'chik, 2019:176—178. (in Russian).

12. **Темников А.Г. и др.** Issledovanie Vliyaniya Grupp Model'nykh Gidrometeorov na Formu i Kharakteristiki Impul'sov Elektromagnitnogo Izlucheniya, Registriruemogo Vblizi Iskusstvennykh Grozovykh Yacheek. Tam zhe:178—180. (in Russian).

13. **Temnikov A.G. et al.** Investigations of Peculiarities of Simulation of the Processes of Initiation of Downward and Intracloud Lightning Using Artificial Thunderstorm Cells. Proc. 11th Asia-Pacific Intern. Conf. Lightning. 2019:279—285.

Сведения об авторах:

Лысов Николай Юрьевич — старший преподаватель кафедры техники и электрофизики высоких напряжений НИУ «МЭИ», e-mail: Streamer.Corona@gmail.com

Орлов Александр Васильевич — кандидат технических наук, доцент кафедры техники и электрофизики высоких напряжений НИУ «МЭИ», e-mail: OrlovAV@mpei.ru

Темников Александр Георгиевич — кандидат технических наук, доцент кафедры техники и электрофизики высоких напряжений НИУ «МЭИ», e-mail: TemnikovAG@mpei.ru

Черненский Леонид Леонидович — кандидат технических наук, доцент кафедры техники и электрофизики высоких напряжений, заведующий НИЛ «Молниезащиты летательных аппаратов» НИУ «МЭИ», e-mail: ChernenskyLL@mpei.ru

Information about authors:

Lysov Nikolay Yu. — Senior Lecturer of High Voltage Engineering and Electrical Physics Dept., NRU MPEI, e-mail: Streamer.Corona@gmail.com

Orlov Aleksandr V. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of High Voltage Engineering and Electrical Physics Dept., NRU MPEI, e-mail: OrlovAV@mpei.ru

Temnikov Aleksandr G. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of High Voltage Engineering and Electrical Physics Dept., NRU MPEI, e-mail: TemnikovAG@mpei.ru

Chernensky Leonid L. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of High Voltage Engineering and Electrical Physics Dept., Head of the Research Laboratory «Lightning protection of aircraft», NRU MPEI, e-mail: ChernenskyLL@mpei.ru

Работа выполнена при поддержке: Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWF-2020-0019)

The work is executed at support: Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FSWF-2020-0019)

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 28.01.2020

The article received to the editor: 28.01.2020