

12

О критерии возникновения восходящего лидера с наземных объектов

© А.Г. Темников, С.В. Гундарева, И.Е. Калугина, Т.К. Герастенок

Национальный исследовательский университет
„Московский энергетический институт“, Москва
E-mail: TemnikovAG@mpei.ru

Поступило в Редакцию 28 августа 2013 г.

Представляются результаты экспериментального исследования процессов формирования восходящего лидерного разряда с заземленного стержневого электрода в электрическом поле искусственного облака заряженного водного аэрозоля. Найдено, что переход вспышки стримерной короны в восходящий лидерный разряд имеет вероятностный характер и определяется, в первую очередь, не амплитудой тока и не только протекавшим через стержень импульсной короны зарядом вспышки, а совокупностью параметров: длительностью протекания тока на достаточно высоком уровне и оптимальным значением протекающего через основание стебля коронного заряда. Выявлен диапазон радиусов кривизны вершины стержневого молниеотвода (от 20 до 25 mm), при которых наблюдается наибольшая вероятность возникновения восходящего лидера.

Одной из существенных проблем в физике молнии и молние-защиты является формирование встречных и восходящих лидерных разрядов с наземных объектов в электрическом поле грозового облака и нисходящего лидера молнии [1,2]. Выявлению физической картины формирования восходящего лидерного разряда с наземного объекта и построению на ее основе физико-математической модели все последние десятилетия уделяется много внимания [1–3].

На сегодняшний день существует несколько различных подходов к моделированию процессов инициирования восходящего лидера, в которых в качестве критерия возникновения восходящего положительного лидера используется или пороговое значение некоторой величины, или выражение для его определения [4]. Они базируются на основе экспериментальных исследований и физико-математического моделирования, проведенного с учетом лабораторных экспериментов, наблюдений за природными и триггерными молниями. В качестве критериев возник-

новения восходящего лидера используются следующие [4]: критическая длина стримерной зоны (от 0.7 до 2.2 м), критическая напряженность электрического поля, создаваемая грозовым облаком и нисходящим лидером молнии на определенном расстоянии от вершины заземленного объекта (от 400 до 500 кВ/м); критический потенциал, наведенный в точке расположения вершины наземного объекта в его отсутствие (от 700 до 1600 кВ), критическая напряженность электрического поля, создаваемая грозовым облаком и нисходящим лидером молнии в точке расположения вершины заземленного объекта (считается, что ее значение зависит от высоты объекта); критический объемный заряд стримерной вспышки, формирующейся с наземного объекта ($Q_{cor} = 1 \mu\text{C}$).

Необходимо отметить, что, во-первых, эти критерии разрабатывались на основе экспериментальных исследований формирования лидерного разряда в длинных воздушных промежутках, к которым прикладывались коммутационные импульсы напряжения (кривые 1–3 на рис. 1). Характер изменения электрического поля в этих случаях существенно отличается от характера изменения электрического поля в месте расположения вершины наземного объекта, вызванного спускающимся нисходящим отрицательным ступенчатым лидером молнии (кривая 4 на рис. 1) или приближающимся грозовым облаком (кривая 5 на рис. 1).

Во-вторых, в указанных выше критериях практически игнорируется случайный характер как внешних условий (например, сложный характер изменения электрического поля, создаваемого грозовым облаком и/или нисходящим лидером молнии, различные атмосферные условия), так и самих разрядных процессов, сопровождающих переход вспышки импульсной стримерной короны в восходящий лидер (в частности, разброс в местах возникновения стримерной короны на поверхности электрода, случайный характер формирования самой импульсной стримерной короны (общие размеры и форма, количество основных ветвей, интенсивность ветвления, угол „раскрыва“), интенсивность предшествовавших разрядных процессов).

Одним из направлений при физическом моделировании процессов формирования разряда молнии, существенно приближающих моделирование к естественной грозовой обстановке, может являться использование искусственных сильно заряженных аэрозольных водных облаков (искусственных грозовых ячеек). Существующие методы создания искусственных грозовых облаков позволяют формировать облака

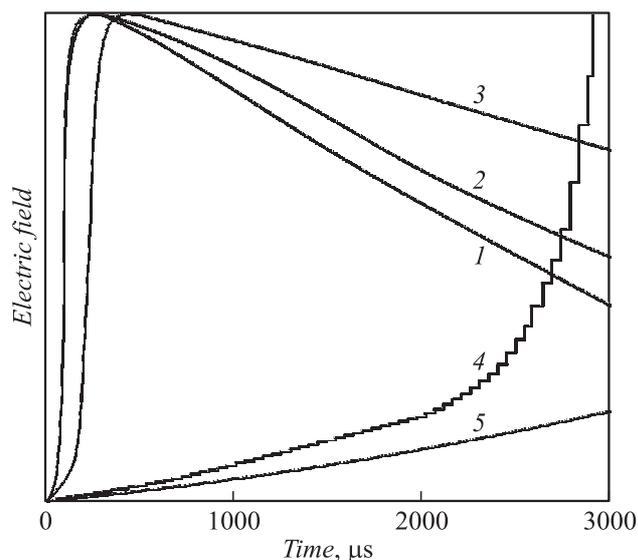


Рис. 1. Характерное изменение электрического поля в месте расположения вершины заземленного объекта: 1–3 — при прикладывании к разрядному промежутку испытательных коммутационных импульсов напряжения (250/2500, 230/3000 и 400/5000 μs соответственно); 4 — при развитии ступенчатого отрицательного нисходящего лидера молнии; 5 — при приближении грозового облака.

объемом до десяти кубических метров и потенциалом в несколько мегавольт. Характеристики экспериментального комплекса и создаваемого им облака заряженного водного аэрозоля отрицательной полярности подробно представлены в [5]. В промежутке „искусственная грозовая ячейка–заземленная плоскость“ может создаваться электрическое поле с напряженностью до 900 kV/m. При экспериментах заземленный стержневой электрод высотой 230 mm располагался в месте, где распределение электрического поля имело квазиоднородный характер. Радиус сферической вершины стержневого электрода R менялся в диапазоне от 0.5 до 35 mm. Основная цель исследований — выявить ключевые параметры стримерной короны, определяющие возможность перехода первой вспышки импульсной стримерной короны с заземленного стержневого объекта в положительный восходящий лидер.

Таблица 1. Характерные параметры (среднее значение и диапазон) импульсной стримерной короны

| Параметры | Длительность, μs | Амплитуда тока, А | Заряд, μC |
|--------------------------------|-----------------------------|-------------------|----------------------|
| Без перехода в лидерный разряд | 6.45 0.27–22.17 | 2.22 0.32–8.89 | 2.36 0.15–6.38 |
| С переходом в лидерный разряд | 2.91 0.42–8.75 | 2.23 0.37–8.98 | 1.61 0.24–4.42 |

Эксперименты по исследованию характеристик восходящего лидера, его возникновения из вспышки стримерной короны и развития показали возможность формирования восходящего лидера как собственно в электрическом поле искусственного облака заряженного аэрозоля, так и при практически одновременном формировании отрицательного нисходящего лидера из облака (варианты 4 и 5 на рис. 1). Осциллограммы тока разряда, характерные для случаев перехода стримерной короны в восходящий лидерный разряд и отсутствия такого события, представлены в [6].

На основании обработки 680 осциллограмм тока разряда установлено значительное различие в электрических характеристиках импульсной стримерной короны для случая перехода ее в лидерный разряд и для случая отсутствия такого перехода (табл. 1).

Найдено, что амплитуда импульса тока вспышки стримерной короны не является определяющим фактором ее перехода в восходящий лидерный разряд. Существенным фактором, влияющим на возможность перехода вспышки стримерной короны в восходящий лидер, является заряд Q_{cor} , протекший через ее основание (рис. 2). Как показали эксперименты с искусственным грозовым облаком, используемое во многих моделях возникновения лидера пороговое значение заряда импульсной короны в $1\mu\text{C}$ действительно относится к наиболее предпочтительному для возникновения лидера диапазону зарядов коронной вспышки в $0.8\text{--}1.2\mu\text{C}$. Однако с ростом величины заряда стримерной вспышки наблюдается тенденция уменьшения вероятности ее перехода в восходящий лидер. В случае импульсной короны с зарядом более $5\mu\text{C}$ не было зарегистрировано ни одного случая ее непосредственного перехода в восходящий лидер.

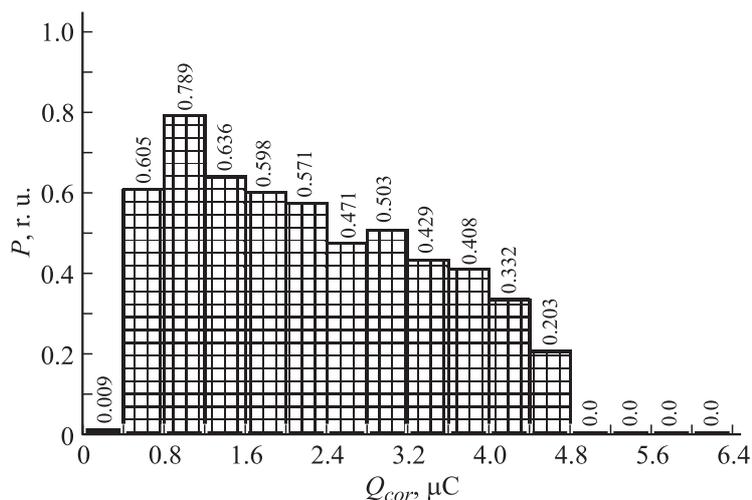


Рис. 2. Вероятность перехода стримерной вспышки в восходящий лидер в зависимости от величины заряда Q_{cor} , протекшего через стебель импульсной короны.

Установлено, что другим определяющим условием возможности перехода стебля импульсной короны в лидерный разряд является не только общий протекший через стебель заряд вспышки импульсной короны, но и длительность промежутка времени ΔT_{cor} ($I > 0.5I_m$), в течение которого ток вспышки первичной короны находился на уровне, близком к максимуму (рис. 3). Вероятность перехода вспышки импульсной стримерной короны приближается к единице, если промежуток времени, когда через стебель импульсной короны протекает ток величины более чем 50% от его максимального значения, превышает $2.8 \mu\text{s}$. В этом случае в основании короны в стебле выделение энергии на относительно высоком уровне продолжается дольше, интенсивнее проходит разогрев канала стебля и сопутствующие ему газодинамические процессы. Это обеспечивает большую вероятность возникновения лидера.

Эксперименты показали существенное влияние на возникновение восходящего лидера размеров сферической вершины стержневого электрода (табл. 2). Для электродов с малыми радиусами вершины

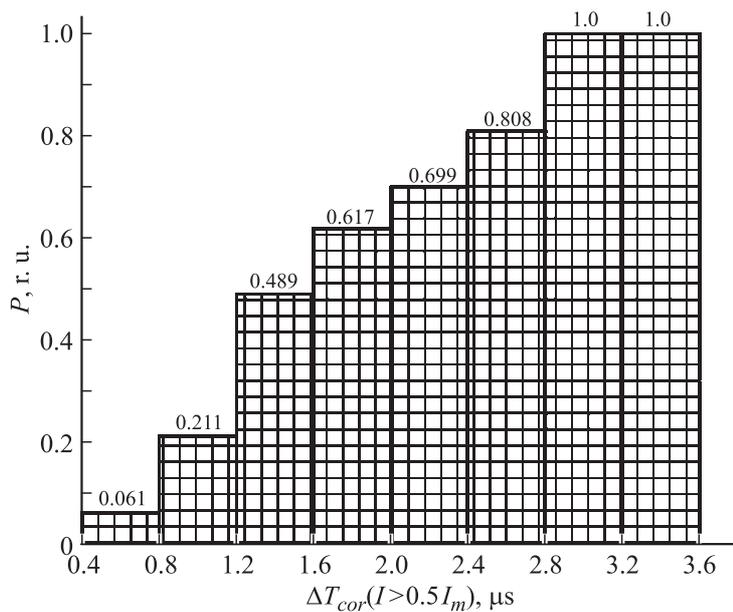


Рис. 3. Вероятность перехода стримерной вспышки в восходящий лидер в зависимости от длительности промежутка времени $\Delta T_{cor}(I > 0.5 I_m)$, когда через стебель импульсной короны протекает ток величиной более чем 50% от его максимального значения.

$R \leq 5 \text{ mm}$ мощность вспышки стримерной короны оказывалась недостаточной для того, чтобы стебель импульсной короны мог интенсивно развиваться и иметь какие-либо существенные шансы перейти в лидер. Найдено, что вероятность формирования восходящего лидера с заземленного стержневого электрода в поле заряженного облака резко возрастала, когда радиус кривизны его вершины превышал 9–10 mm. Выявлен диапазон радиусов кривизны вершины стержневого электрода (от 20 до 25 mm), при которых наиболее вероятно формирование импульсной стримерной короны с такими параметрами, когда обеспечиваются лучшие условия для старта восходящего лидера. Для электродов с большими радиусами кривизны вершины более характерны мощные вспышки стримерной короны, при которых, как видно на рис. 2, вероятность перехода в лидер снижается.

Таблица 2. Вероятность перехода вспышки импульсной стримерной короны в восходящий лидер в зависимости от радиуса сферической вершины стержневого электрода

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $R, \text{ mm}$ | 0.5 | 5 | 9 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 |
| $P, \text{ r.u.}$ | 0 | 0 | 0.581 | 0.568 | 0.667 | 0.717 | 0.724 | 0.674 | 0.479 |

Таким образом, переход вспышки импульсной стримерной короны в восходящий лидерный разряд определяется совокупностью параметров: длительностью существования разрядного тока на достаточно высоком уровне и оптимальным значением протекшего через основание стебля коронного заряда. Причем при разработке критерия возникновения восходящего лидера с наземных объектов необходимо учитывать вероятностный характер обоих этих параметров.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 13-08-01000-а) и Минобрнауки РФ (проект № 14.132.21.1803).

Список литературы

- [1] Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001.
- [2] Rakov V.A., Rachidi F. // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2009. V. 51. N 3. P. 428–442.
- [3] Rakov V.A. // J. Lightning Research. 2012. V. 4. P. 3–11.
- [4] Lightning protection / Ed. by V. Cooray. IET Power and Energy. Ser. 58 / The Institution of Engineering and Technology. London, United Kingdom, 2010.
- [5] Темников А.Г., Орлов А.В., Болотов В.Н., Ткач Ю.В. // ЖТФ. 2005. Т. 75. В. 7. С. 52–59.
- [6] Temnikov A.G., Chernensky L.L., Orlov A.V., Sokolova M.V., Gerastenok T.K., Belova O.S. // IEEE Conference Publications: Lightning Protection (ICLP). 2012. International Conference on, 2012. 6344280.