

12

Влияние вида модельных гидрометеоров на формирование разряда между искусственной грозовой ячейкой и землей

© А.Г. Темников, Л.Л. Черненский, А.В. Орлов, Н.Ю. Лысов,
О.С. Белова, Т.К. Герастенок, Д.С. Журавкова

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

Поступило в Редакцию 5 июля 2017 г.

Представлены результаты экспериментального исследования влияния групп крупных модельных гидрометеоров различного вида на инициирование и распространение разряда между искусственной грозовой ячейкой отрицательной или положительной полярности и землей. Впервые показано, что вероятность инициирования и стимулирование распространения канального разряда между отрицательно или положительно заряженным облаком и землей существенно зависят от формы и размеров крупных гидрометеоров, находящихся вблизи границ грозовой ячейки. Полученные результаты могут быть использованы при разработке методов искусственного инициирования молнии типа „облако–земля“ обеих полярностей и целенаправленной разрядки грозового облака.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.24.45338.16952

В настоящее время гипотеза инициирования молнии „облако–земля“ массивами крупных гидрометеоров (в первую очередь градин), находящихся в грозовом облаке, снова становится одной из приоритетных [1,2]. Именно ей уделяется много внимания как при теоретическом, так и при экспериментальном моделировании [3–6]. При этом наблюдается большой разброс по видам используемых гидрометеоров. В теоретических моделях чаще всего рассматриваются объемные симметричные гидрометеоры: гидрометеоры в форме эллипсоидов вращения с различным соотношением большой и малой полуосей [3–5] или цилиндрические гидрометеоры с различными вариантами формы вершин модельного цилиндра [3]. В экспериментах обычно моделируются гидрометеоры игольчатой или сферической формы [3,6,7]. В большин-

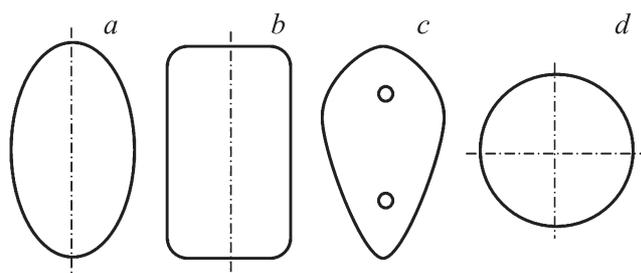


Рис. 1. Варианты вида модельных гидрометеоров: *a* — объемные эллипсоидальные, *b* — объемные цилиндрические, *c* — плоские ромбовидные, *d* — сферические.

стве случаев исследуется влияние на инициирование и распространение разряда отдельных гидрометеоров, а не их групп. Более того, как при теоретическом, так и при экспериментальном моделировании инициирования молнии из грозового облака делается упор практически только на возникновение с гидрометеора стримерного разряда (хотя распространение разряда между облаком и землей происходит в лидерной форме) и не учитываются процессы возможного взаимодействия таких стримеров с заряженным облаком [3,8,9]. Применение искусственных грозových ячеек и модельных гидрометеоров различного вида (в том числе тех, форма которых существенно отличается от симметричной) на инициирование и развитие канального разряда между искусственной грозовой ячейкой отрицательной или положительной полярности и землей и определить перспективы искусственного инициирования молнии между грозовым облаком и землей путем целенаправленного введения в облако групп модельных гидрометеоров.

Исследование влияния групп модельных гидрометеоров на инициирование и распространение разряда между искусственной грозовой ячейкой отрицательной или положительной полярности и землей выполнено на экспериментальном комплексе „ГРОЗА“ [9,10]. Варианты форм модельных гидрометеоров показаны на рис. 1. Использовались группы из четырех независимо подвешенных проводящих модельных гидрометеоров различного вида: эллипсоиды вращения длиной 3.5 см и диаметром 1.8 см (вариант 1) (рис. 1, *a*), цилиндры с закругленными

краями длиной 3.5 см и диаметром 2.8 см (вариант 2) (рис. 1, *b*), плоский ромб длиной 7.0 см и толщиной 0.1 см (вариант 3) (рис. 1, *c*), сферы диаметром 3.6 см (вариант 4) (рис. 1, *d*). Расстояние между соседними гидрометеорами составляло 2.7 см. Группа модельных гидрометеоров формировалась вблизи нижней границы искусственной грозовой ячейки. Изменение напряженности электрического поля в месте расположения группы модельных гидрометеоров регулировалось изменением тока выноса генератора заряженного аэрозоля I_{outlet} с шагом $10 \mu\text{A}$ (увеличение напряженности поля примерно на 9–11% на каждом шаге). Максимальный потенциал искусственной грозовой ячейки достигал 1.0–1.1 MV. Для каждого варианта формы модельных гидрометеоров, полярности и заряда искусственной грозовой ячейки было проведено от сорока до шестидесяти экспериментов. В результате суммарное время существования заряженного облака для каждого экспериментального варианта превышало 600 s. Характерная картина инициирования группой модельных гидрометеоров канальных разрядов между заряженным облаком и землей для искусственных грозовых ячеек отрицательной и положительной полярности показана на рис. 2, *a* и *b* соответственно.

Эксперименты показали существенное влияние вида модельных гидрометеоров на инициирование и распространение канальных разрядов между искусственной грозовой ячейкой и землей. Плоские ромбовидные модельные гидрометеоры обеспечивали наибольшую вероятность инициирования канального разряда из искусственной отрицательно заряженной грозовой ячейки (рис. 3, *a*). При токах выноса генератора заряженного аэрозоля в диапазоне от 100 до $110 \mu\text{A}$ она достигала 55–60%. При дальнейшем увеличении заряда ячейки вероятность инициирования канального разряда ромбовидными модельными гидрометеорами начинала уменьшаться. Аналогичная тенденция (но при вероятностях инициирования разряда между облаком и землей, в несколько раз меньших по величине) наблюдалась при использовании группы модельных гидрометеоров эллипсоидальной формы. Для сферических модельных гидрометеоров и гидрометеоров цилиндрической формы установлена тенденция увеличения вероятности инициирования канального разряда между искусственной грозовой ячейкой и землей с ростом заряда отрицательно заряженного облака (рис. 3, *a*). При токах выноса генератора заряженного аэрозоля $120 \mu\text{A}$ вероятность инициирования разряда между облаком и землей достигала 23 и 41%

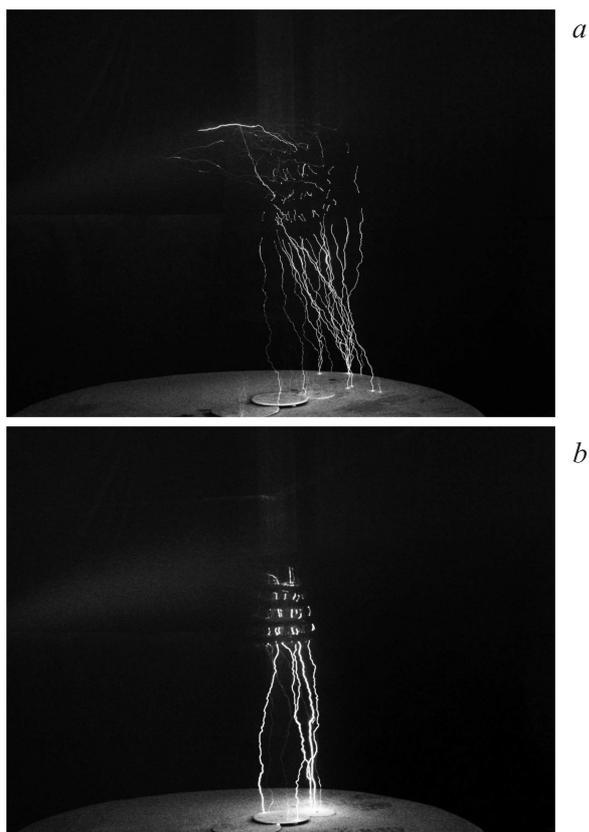


Рис. 2. Инициирование группами модельных гидрометеоров канальных разрядов между искусственной грозовой ячейкой отрицательной (*a*) и положительной (*b*) полярности и землей.

для групп модельных гидрометеоров сферической и цилиндрической формы соответственно.

Эксперименты показали, что при положительно заряженной искусственной грозовой ячейке для всех рассмотренных форм модельных гидрометеоров наблюдается практически линейный рост вероятности инициирования канального разряда между заряженным облаком и зем-

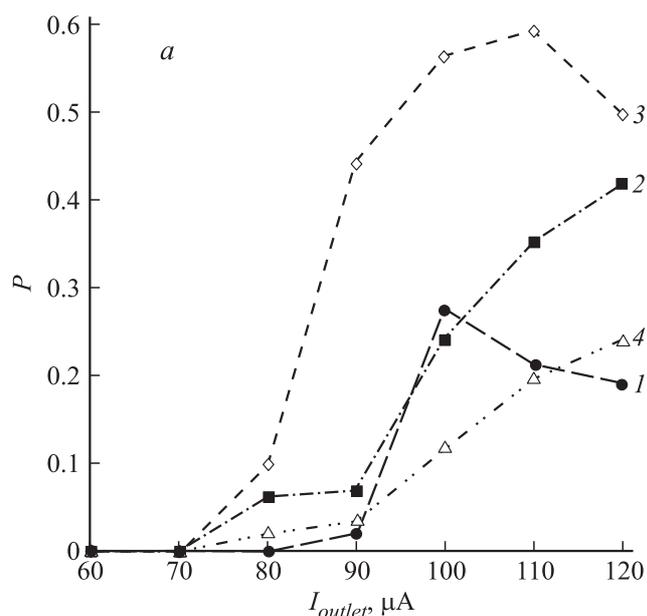


Рис. 3. Вероятность инициирования канальных разрядов между искусственной грозовой ячейкой отрицательной (*a*) и положительной (*b*) полярности и землей группами модельных гидрометеоров разного вида: эллипсоиды вращения (1), цилиндры с закругленными краями (2), плоские ромбы (3), сферические (4).

лей при токах выноса генератора заряженного аэрозоля более $100 \mu A$ (рис. 3, *b*). При этом наибольшие вероятности инициирования канальных разрядов обеспечивали группы модельных гидрометеоров цилиндрической и сферической формы (до 58 и 33% соответственно). А вероятность инициирования канальных разрядов из искусственной грозовой ячейки плоскими ромбовидными гидрометеорами не превышала нескольких процентов даже при максимальных зарядах облака. Это связано с большим значением коэффициента усиления электрического поля для плоских ромбовидных гидрометеоров. В результате отрицательная лавинная корона возникает с ближайших к облаку модельных гидрометеоров при значениях напряженности внешнего электрического поля, создаваемого положительно заряженной искусственной грозовой

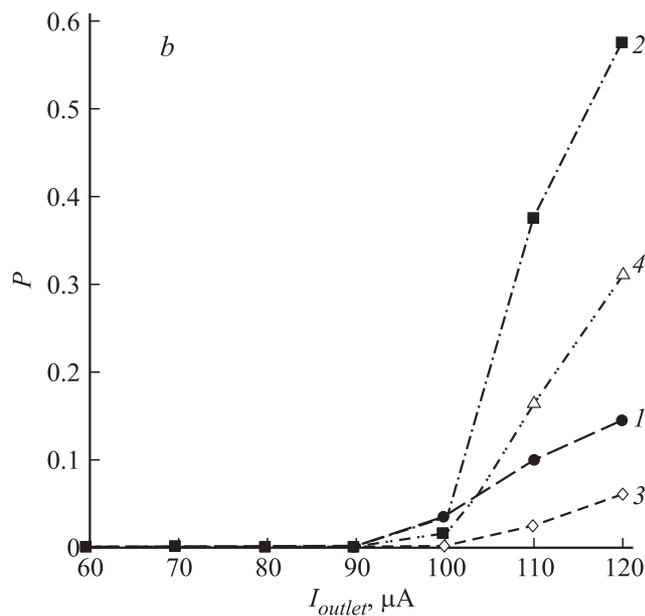


Рис. 3 (продолжение).

ячейкой, 1.5–2.0 kV/cm. Это приводит к частичной разрядке грозовой ячейки [10]. Поэтому, несмотря на увеличение тока выноса генератора заряженного аэрозоля, напряженность поля в месте нахождения группы модельных гидрометеоров меняется слабо и оказывается недостаточной для формирования канальных разрядов с гидрометеоров в сторону земли.

Таким образом, экспериментально установлено, что вид (форма) гидрометеоров является одним из ключевых факторов, влияющих на вероятность инициирования канальных разрядов между искусственной грозовой ячейкой и землей группами модельных гидрометеоров.

Для инициирования и стимулирования развития разряда между положительно заряженной искусственной грозовой ячейкой и землей наиболее перспективны группы крупных объемных гидрометеоров сантиметрового диапазона размеров, характеризующихся относительно небольшим коэффициентом усиления электрического поля

($K_{amp} \sim 5-7$). В этом случае приоритетным является формирование искровых разрядов между гидрометеорами в группе, а также развитие канальных разрядов между нижними гидрометеорами в группе и землей. При этом для большинства форм модельных гидрометеоров развитие канальных разрядов с группы модельных гидрометеоров в сторону положительно заряженной искусственной грозовой ячейки практически не наблюдается (рис. 2, *b*).

При отрицательном заряде искусственной грозовой ячейки канальный разряд между облаком и землей лучше провоцировали группы крупных гидрометеоров „неправильной“ формы, у которых или один из характерных размеров меньше двух остальных (например, плоские ромбовидные с $K_{amp} \sim 30-35$), или присутствуют локальные места дополнительного усиления электрического поля (например, объемные цилиндры с закругленными краями). При этом для всех форм модельных гидрометеоров при отрицательной полярности искусственной грозовой ячейки наблюдается бинаправленное развитие канальных разрядов от группы гидрометеоров: от нижних гидрометеоров в группе в сторону земли и от верхних гидрометеоров в глубь искусственной грозовой ячейки и вдоль ее границ (рис. 2, *a*).

Таким образом, экспериментальные исследования с использованием искусственных грозовых ячеек показали, что группы крупных гидрометеоров сантиметрового диапазона размеров (градин) наиболее перспективны для инициирования канального разряда между заряженным облаком положительной или отрицательной полярности и землей, когда они имеют форму, при которой коэффициент усиления электрического поля находится в диапазоне $K_{amp} \sim 5-40$. На гидрометеорах, характеризующихся большими значениями коэффициентов усиления электрического поля (например, ледяных кристаллах, которые, как предполагается, играют роль в инициировании молнии [3,4,8]), в электрическом поле облака может инициироваться коронный разряд, но его интенсивность будет недостаточной для перехода в объемный лидер, который является необходимым условием для формирования канального разряда между облаком и землей [11]. Введение в грозовое облако аналогов крупных ледяных кристаллов, скорее всего, будет только локально нейтрализовать заряд близлежащей части грозовой ячейки [12].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00160).

Список литературы

- [1] *Rakov V.A., Rachidi F.* // IEEE Transact. Electromagn. Compatibility. 2009. V. 51. Iss. 3. P. 428–442.
- [2] *Dwyer J.R., Uman V.A.* // Phys. Rep. 2014. V. 534. Iss. 4. P. 147–241.
- [3] *Petersen D., Bailey M., Hallett J., Beasley W.* // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2015. V. 141. Iss. 689. P. 1283–1293.
- [4] *Dubinova A., Rutjes C., Ebert U., Buitink S., Scholten O., Trinh T.N.G.* // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. Iss. 1. P. 015002.
- [5] *Babich L.P., Bochkov E.I., Neubert T.* // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2017. V. 154. P. 43–46.
- [6] *Mazur V., Taylor C.D., Petersen D.A.* // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2015. V. 120. Iss. 20. P. 10879–10889.
- [7] *Mazur V., Taylor C.D., Petersen D.A.* // Proc. of the Asia-Pacific Int. Conf. on Lightning. Nagoya, Japan, 2015.
- [8] *Liu N.Y., Dwyer J.R., Rassoul H.K.* // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2012. V. 80. P. 179–186.
- [9] *Temnikov A.G.* // IEEE Conf. Publications: Int. Conf. on lightning protection (ICLP). Vienna, 2012. P. 6344279.
- [10] *Темников А.Г., Черненкоский Л.Л., Орлов А.В., Лысов Н.Ю., Белова О.С., Калугина И.Е., Герастенок Т.К., Журавкова Д.С.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. В. 4. С. 32–38.
- [11] *Lalande P., Bondiou-Clergerie A., Gallimberti I., Vacchiega G.L.* // C. R. Physique. 2002. V. 3. Iss. 10. P. 1375–1392.
- [12] *Верещагин И.П., Морозов В.С., Стырикович И.М.* // Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1986. № 5. С. 84–94.