

12

## **Физическое моделирование процессов формирования повторных ударов отрицательной молнии с использованием искусственных грозовых ячеек**

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

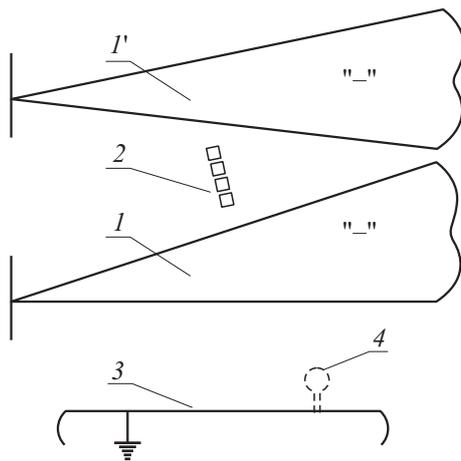
Национальный исследовательский университет  
„Московский энергетический институт“,  
Москва, Россия  
E-mail: TemnikovAG@mpei.ru

Поступило в Редакцию 25 апреля 2018 г.

Представлены результаты физического моделирования влияния групп крупных модельных гидрометеоров на процессы формирования повторных ударов отрицательной молнии с использованием системы искусственных грозовых ячеек. Впервые показано, что введение группы крупных модельных гидрометеоров в пространство между отрицательно заряженными ячейками существенно увеличивает вероятность формирования повторного разряда, общую длину разрядной системы и величину нейтрализуемого заряда. Установлено влияние гидрометеоров на параметры импульсов тока первого и повторного разрядов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке методов искусственного стимулирования формирования многоударной молнии и целенаправленной разрядки грозового облака.

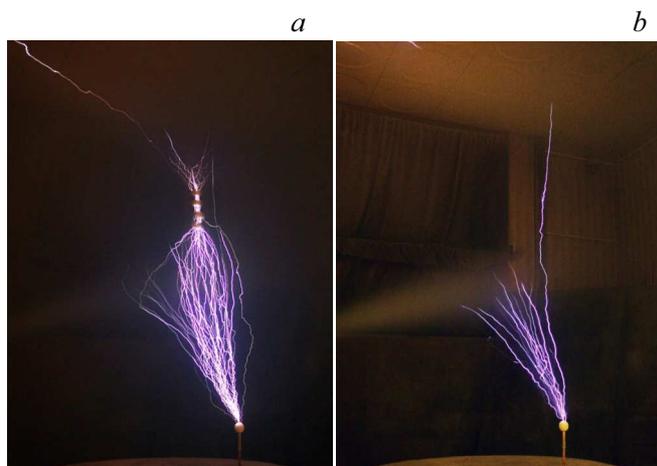
DOI: 10.21883/PJTF.2018.17.46571.17357

Отрицательная нисходящая молния бывает многоударной в 70–80% случаев [1–4]. При этом механизмы „подключения“ к месту возникновения в грозовом облаке первого главного разряда соседних областей с повышенной плотностью отрицательного заряда (грозовых ячеек) и соответственно формирования повторных разрядов молнии являются одними из наименее исследованных в физике грозы [1,2,4,5]. В последние годы все большее внимание уделяется возможному влиянию массивов града на разрядные процессы в грозовом облаке, в том числе на инициирование молнии и общее усиление активности внут-



**Рис. 1.** Расположение группы модельных гидрометеоров в промежутке между отрицательно заряженными искусственными грозowymi ячейками. Пояснения в тексте.

риоблачных молний и молний типа облако–земля [6,7]. Использование отрицательно заряженной ячейки показало, что формирование разряда между ячейкой и землей в редких случаях приводило к формированию повторного разряда с вовлечением областей заряда этой же ячейки, соседних с местом контакта первого разряда с заряженным облаком [8]. При создании системы искусственных грозowych ячеек вероятность формирования повторного разряда между нижней ячейкой и землей по такому сценарию росла, но „подключения“ верхней ячейки к разрядному процессу в случаях, когда заряд верхней ячейки по величине был меньше заряда нижней ячейки, не происходило [9]. Физическое моделирование с использованием системы искусственных грозowych ячеек отрицательной полярности и групп модельных гидрометеоров дает возможность выявить возможное влияние крупных гидрометеоров на процессы формирования многоударной молнии между грозowym облаком и землей и определить перспективные пути целенаправленной разрядки грозowego облака путем искусственного провоцирования повторных ударов молнии.



**Рис. 2.** Характерная картина формирования канальных разрядов между системой отрицательно заряженных ячеек и землей с участием (а) и в отсутствие (б) группы модельных гидрометеоров.

Физическое моделирование процессов формирования повторных ударов отрицательной молнии с использованием системы искусственных грозовых ячеек отрицательной полярности и исследования влияния групп модельных гидрометеоров на инициирование и распространение повторных разрядов были проведены на экспериментальном комплексе, описанном в [8,10]. Характерная картина двух искусственных грозовых ячеек  $I$  и  $I'$  с расположением между ними группы модельных гидрометеоров 2 показана на рис. 1. Нижняя ячейка  $I$  и верхняя ячейка  $I'$  располагались над поверхностью земли 3 на высотах 0.75–1.2 и 1.65–2.1 м соответственно. Под системой отрицательно заряженных искусственных грозовых ячеек на заземленной плоскости устанавливался стержневой электрод 4 со сферической вершиной. Ток первого и повторного разрядов между системой искусственных грозовых ячеек и заземленным стержнем регистрировался цифровым запоминающим осциллографом одновременно с его оптическим и электромагнитным излучением. Экспериментальные исследования в системе верхняя отрицательная искусственная грозовая ячейка–нижняя отрицательная искусственная

**Таблица 1.** Вероятность формирования повторного разряда между системой отрицательно заряженных ячеек и землей (в %)

	Ток выноса нижней ячейки / ток выноса верхней ячейки, $\mu\text{A}$			
	100/(60–80)	100/(80–100)	100/(100–120)	100/(120–140)
В присутствии гидрометеоров	0.0	24.3	38.4	69.7
В отсутствие гидрометеоров	0.0	2.2	19.1	45.4

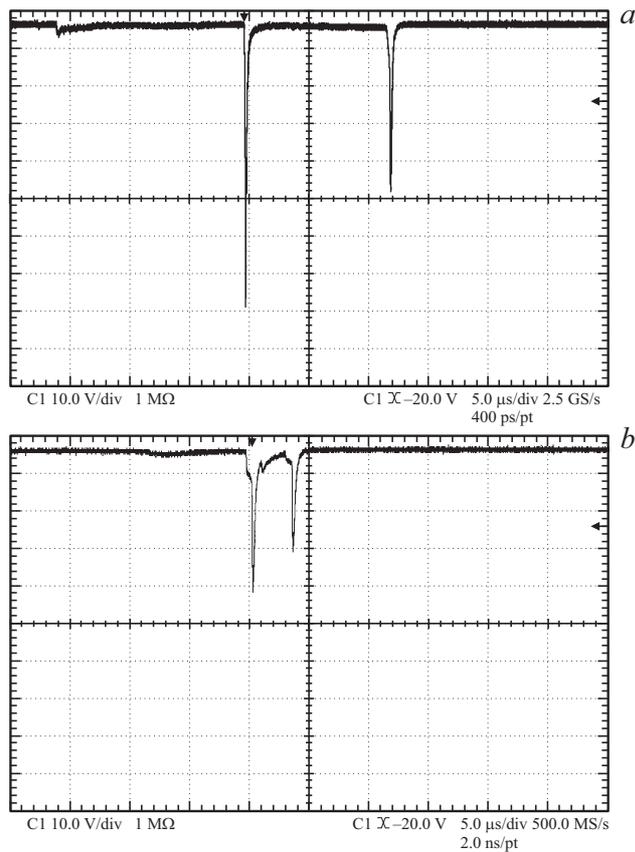
грозовая ячейка–стержневой заземленный электрод были проведены в присутствии и в отсутствие группы модельных гидрометеоров в пространстве между заряженными ячейками. Группа модельных гидрометеоров формировалась из проводящих цилиндров длиной 3.5 см, расстояние между гидрометеорами в группе составляло 3.0 см. В течение обеих серий экспериментов заряд нижней ячейки поддерживался на одном уровне (ток выноса генератора заряженного аэрозоля  $100\mu\text{A}$ ). При этом варьировался заряд верхней ячейки через изменение тока выноса генератора заряженного аэрозоля в диапазоне от 60 до  $140\mu\text{A}$  с шагом примерно  $20\mu\text{A}$ . Максимальный потенциал системы двух отрицательно заряженных ячеек достигал 1.4 MV. Время существования системы искусственных грозовых ячеек при каждом экспериментальном подходе составляло 10 s. Характерная картина формирования канальных разрядов между системой отрицательно заряженных искусственных грозовых ячеек и землей при наличии и отсутствии группы модельных гидрометеоров показана на рис. 2.

Эксперименты показали существенное влияние величины заряда верхней искусственной грозовой ячейки (тока выноса генератора заряженного аэрозоля  $I_{outlet}$ ) и присутствия массива модельных гидрометеоров между ячейками на вероятность того, что канал первого разряда, сформировавшегося между нижней отрицательно заряженной ячейкой и землей, сможет продолжить свое развитие в пространстве между отрицательно заряженными искусственными грозовыми ячейками, „подключить“ верхнюю ячейку к каналу первого разряда и

соответственно инициировать формирование повторного разряда между системой отрицательно заряженных ячеек и землей (табл. 1).

Если заряд верхней искусственной грозовой ячейки меньше заряда нижней ячейки, то верхняя ячейка напрямую не участвовала в формировании главной стадии разряда. В отсутствие гидрометеоров каналы разряды формировались только между нижней заряженной ячейкой и землей, практически не выходя за верхние границы нижней ячейки. При наличии модельных гидрометеоров в пространстве между заряженными ячейками в четверти случаев каналы разряды проходили через нижнюю ячейку, доходили до группы гидрометеоров, останавливались и дальше в сторону верхней ячейки не распространялись. Когда заряд верхней ячейки становился больше, чем заряд нижней ячейки, верхняя ячейка начинала напрямую участвовать в формировании повторных разрядов между системой заряженных облаков и землей. В случае присутствия гидрометеоров „подключение“ верхней заряженной ячейки и формирование повторного разряда происходило в 70% случаев (при отсутствии гидрометеоров эта доля была в 1.5–2.0 раза меньше). При этом максимальная длина разрядной системы увеличивалась в 9–12 раз относительно линейных размеров самой группы модельных гидрометеоров, участвующих в формировании повторных разрядов.

Анализ и обобщение полученного массива осциллограмм тока главной стадии разрядов, формирующихся с участием обеих искусственных грозовых ячеек отрицательной полярности, выявили два вида импульса тока, характерных для случаев формирования повторных разрядов (рис. 3). Вариант 1 — двойной импульс с длительной паузой между импульсами, в течение которой продолжительный ток имеет средние значения, не превышающие  $\sim 1$  А (рис. 3, *a*). Вариант 2 — двойной импульс с паузой между импульсами, в течение которой наблюдается явно выраженный продолжительный ток, имеющий в среднем величину 4–8 А (рис. 3, *b*). Для экспериментов с наличием гидрометеоров между искусственными грозовыми ячейками регистрировался только первый вид импульсов тока главной стадии разряда. Длительность паузы между импульсами составляла 4–14  $\mu$ s. Второй вид импульсов тока регистрировался для обеих экспериментальных серий (с массивом гидрометеоров между ячейками и без него). Длительность стадии продолжительного тока между импульсами в этом случае не превышала 2–3  $\mu$ s.



**Рис. 3.** Характерные осциллограммы токов первого и повторного разряда между системой отрицательно заряженных ячеек и землей с участием (а) и в отсутствие (б) группы модельных гидрометеоров.

Установлено существенное различие между параметрами импульсов тока первого и повторного разрядов (табл. 2). Амплитуда первого импульса тока в двух ударных разрядах между системой отрицательно заряженных ячеек и землей при участии массива гидрометеоров в пространстве между ячейками в среднем была в 1.4–2.2 раза больше

**Таблица 2.** Параметры импульсов тока (средние значения) первого и повторного разрядов между системой отрицательно заряженных ячеек и землей (вариант 1/вариант 2)

	Амплитуда импульса тока, А		Импульсный заряд, $\mu\text{C}$	
	Первый разряд	Повторный разряд	Первый разряд	Повторный разряд
В присутствии гидрометеоров	75.3 / 57.4	33.4 / 39.6	17.5 / 14.7	15.3 / 16.2
В отсутствие гидрометеоров	– / 41.9	– / 40.2	– / 7.1	– / 15.1

амплитуды импульса тока повторного разряда. Только менее чем в 9% случаев амплитуда второго импульса тока была больше, чем амплитуда первого импульса. Это коррелирует с данными [3], показывающими, что обычно амплитуда тока первого главного разряда молнии в 2–3 раза выше, чем амплитуды тока последующих разрядов, и приблизительно в 7% случаев повторные разряды имеют большую амплитуду тока, чем первый удар. В отсутствие модельных гидрометеоров такой связи между импульсами тока в двух ударных разрядах не наблюдалось. Эксперименты показали, что импульсные заряды первого и повторного разрядов, формирующихся между отрицательно заряженными ячейками и землей с участием группы гидрометеоров, близки по величине. При этом суммарный заряд, нейтрализуемый в двух ударных разрядах, в среднем был в 1.5 раза больше, чем в случае отсутствия гидрометеоров в промежутке между ячейками.

Таким образом, присутствие массивов крупных гидрометеоров (града) в отрицательно заряженной части грозового облака может существенно увеличить вероятность формирования повторных разрядов молнии в землю, например стимулируя развитие в нем возвратных стримеров и отрицательных лидеров [4,5].

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

## Список литературы

- [1] *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 320 с.
- [2] *Rakov V.A., Uman M.A.* Lightning: physics and effects. Cambridge University Press, 2003. 687 p.
- [3] *Lightning* parameters for engineering applications. CIGRÉ. 2013. Techn. Bull. 549.
- [4] *Dwyer J.R., Uman V.A.* // Phys. Rep. 2014. V. 534. P. 147–241.
- [5] *Mazur V.* Principles of lightning physics. IOP Publ., Ltd, 2016. 182 p.
- [6] *Emersic C., Heinsel P.L., MacGorman D.R., Bruning E.C.* // Monthly Weather Rev. 2011. V. 139. P. 1809–1824.
- [7] *Wang F., Zhang Y., Zheng D., Xu L., Zhang W., Meng Q.* // J. Meteorol. Res. 2017. V. 31. N 5. P. 976–986.
- [8] *Temnikov A.G.* // 2012. Int. Conf. on lightning protection (ICLP). IEEE Conf. Publ., 2012. DOI: 10.1109/ICLP. 2012. 6344279
- [9] *Temnikov A.G.* // Elect. Power Syst. Res. 2014. V. 113. P. 3–9.
- [10] *Темников А.Г., Черненский 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.