

04;12

Исследование влияния модельных гидрометеоров на развитие разряда из искусственного облака заряженного водного аэрозоля

© А.Г. Темников, А.В. Орлов, Л.Л. Черненский, В.П. Писарев

Московский энергетический институт (Технический университет)

E-mail: temnikov@fee.mpei.ac.ru

Поступило в Редакцию 31 октября 2006 г.

Представляются результаты экспериментальных исследований инициирования и распространения разряда в облаках заряженного водного аэрозоля в присутствии крупных модельных гидрометеоров. Установлено, что инициирование и развитие искрового разряда в промежутке „заряженное аэрозольное облако–заземленная плоскость“ зависит от параметров гидрометеоров, от места, где располагается группа гидрометеоров, и напряженности внешнего электрического поля. Найдено, что группа проводящих цилиндрических модельных гидрометеоров является наиболее подходящей для инициирования искрового разряда в облаках заряженного аэрозоля. Установлены оптимальные конфигурации группы гидрометеоров для инициирования или направления разряда. Проанализированы характеристики финальной стадии разряда из облака заряженного аэрозоля в присутствии группы модельных гидрометеоров.

PACS: 92.60.Pw

1. Проблема определения условий инициирования молнии в естественных электрически активных облаках является наименее изученной. Как отмечается в [1,2], гидрометеоры (капли воды различного размера, замерзающие капли, ледяные кристаллы различной формы, большие и малые градины и их комбинации) могут быть инициаторами разрядных явлений в грозовых облаках. Размеры гидрометеоров в естественных облаках оцениваются от долей микрометра до единицы сантиметров [3]. Помимо инициирования, гидрометеоры могут оказать существенное влияние и на развитие последующих стадий разряда молнии, особенно на ее финальную (главную) стадию, в течение которой происходит быстрая, интенсивная нейтрализация части заряда грозового обла-

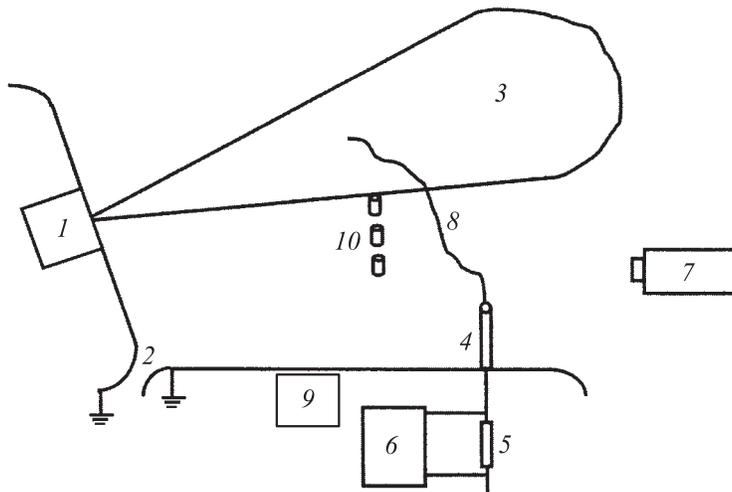


Рис. 1. Схема экспериментального комплекса: 1 — генератор заряженного аэрозоля; 2 — заземленные электростатические экраны; 3 — облако заряженного водного аэрозоля; 4 — стержневой электрод со сферической вершиной; 5 — малоиндуктивный шунт; 6 — цифровой запоминающий осциллограф; 7 — цифровая фотокамера; 8 — искровой разряд; 9 — датчик напряженности электрического поля; 10 — группа модельных гидрометеоров.

ка [4,5]. Все эти проблемы или не исследовались, или изучались в условиях, далеких от реальной грозовой обстановки [6]. Целью работы было физическое моделирование процессов инициирования молнии в грозовых облаках и нейтрализации облачного заряда в них, используя искусственное сильно заряженное облако водного аэрозоля для экспериментального исследования разрядных явлений в облаке заряженного водного аэрозоля в присутствии крупных модельных гидрометеоров.

2. Общие параметры экспериментального комплекса приведены в [7,8]. Он позволяет создавать облака заряженного аэрозоля, которые имеют потенциал до 1.5–2 MV и могут создавать поля до 17–19 kV/cm вблизи своих границ. Схема экспериментального комплекса показана на рис. 1. Эксперименты проводились при отрицательной полярности искусственного заряженного аэрозольного облака, так как первоначальное инициирование разрядных явлений в грозовом облаке происходит

вблизи отрицательного облачного заряда. Характерное распределение электрического поля внутри заряженного аэрозольного облака и в промежутке „облако заряженного аэрозоля—заземленная плоскость“ показано в [7,8]. Отдельные частицы и группы частиц размером \sim см различной формы размещались вблизи границы облака, внутри него и в промежутке между облаком заряженного аэрозоля и стержневым электродом на заземленной плоскости. Высота стержневого электрода была 120 mm, радиус его сферической вершины 25 mm. Ток разряда измерялся малоиндуктивным шунтом и цифровым осциллографом Tektronix TDS 3052. Оптическая картина расположения модельных гидрометеоров в промежутке „облако заряженного аэрозоля—заземленная плоскость“, наличие или отсутствие разрядного явления в нем, пути распространения разряда в присутствии модельных частиц фиксировались цифровой камерой Canon PowerShot G1.

3. Было найдено, что одиночные модельные гидрометеоры или их группы, расположенные внутри облака заряженного аэрозоля, практически не влияли на возникновение и развитие разряда в промежутке „облако заряженного аэрозоля—заземленная плоскость“, так как напряженность электрического поля внутри облака существенно меньше, чем вблизи его границ. Плоские вытянутые проводящие модельные гидрометеоры, расположенные вблизи границы заряженного аэрозольного облака, также не инициировали канальных искровых разрядов. Из-за большого коэффициента усиления поля на острых краях таких модельных частиц лавинная корона возникала, когда облако заряженного аэрозоля еще не достигло своего максимального заряда (для формирования полностью заряженного аэрозольного облака требуется не менее нескольких секунд). В результате ионы лавинной короны направлялись в облако заряженного аэрозоля и частично разряжали аэрозольные частицы и соответственно ближайšie к гидрометеорам части облака заряженного аэрозоля. Общий заряд облака переставал нарастать, и напряженность электрического поля облака оказывалась недостаточной для инициирования интенсивных искровых разрядных явлений в промежутке „облако заряженное аэрозольное облако—стержень на заземленной плоскости“.

4. Отличная картина наблюдалась в присутствии в промежутке группы проводящих цилиндрических модельных гидрометеоров с относительно небольшим коэффициентом усиления поля. В этом случае вероятность инициирования и направление развития искрового канального разряда в облаке заряженного аэрозоля зависела от: 1) места в



Рис. 2. Группа модельных гидрометеоров инициирует разрядные явления вблизи границ облака заряженного аэрозоля.

промежутке „заряженное аэрозольное облако—заземленная плоскость“, где располагается группа, 2) количества гидрометеоров в группе, 3) расстояния между гидрометеорами, 4) величины внешнего электрического поля в месте расположения группы.

Если группа из трех последовательно расположенных проводящих цилиндрических модельных гидрометеоров располагается в области вблизи вершины стержня, то все частицы участвуют в „направлении“ восходящего разряда. Когда группа расположена ближе к границам заряженного аэрозольного облака, то она может или сама инициировать разряд в промежутке „облако заряженного аэрозоля—стержень на заземленной плоскости“, или быть „проводником“ восходящего искрового разряда, стартовавшего с заземленного стержня (рис. 2). Выбор определяется формой короны, возникающей на группе гидрометеоров со стороны заряженного аэрозольного облака. Если только лавинная корона возникла с конца группы модельных гидрометеоров, ближнего к облаку заряженного аэрозоля, то эта группа модельных гидрометеоров могла лишь „направлять“ уже возникший разряд с заземленного стержня. Если же стримерная корона формировалась с конца группы модельных гидрометеоров, то вероятность инициирования разряда существенно возростала, т.е. группа из проводящих цилиндри-

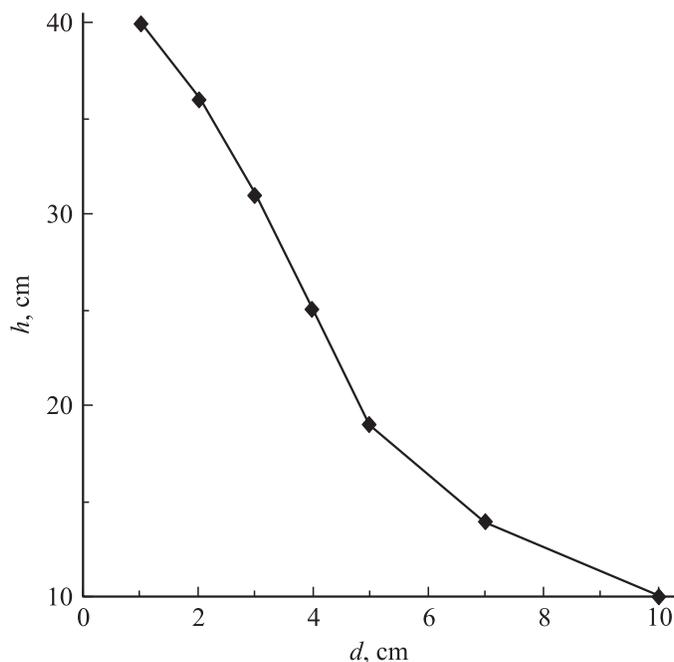


Рис. 3. Зависимость высоты группы модельных гидрометеоров от расстояния между гидрометеорами, когда вся группа участвует в инициировании и/или распространении разряда.

ческих модельных гидрометеоров является наиболее подходящей для инициирования искрового разряда в заряженных аэрозольных облаках. Более того, возможность инициировать и направлять искровой разряд существенно зависит от расстояния между последовательно расположенными модельными гидрометеорами и от расположения группы в промежутке „облако заряженного аэрозоля–заземленная плоскость“. С увеличением высоты расположения группы модельных гидрометеоров над землей, расстояние между модельными гидрометеорами в группе, когда все они участвуют в инициировании искрового разряда и/или в его распространении, уменьшается (рис. 3).

Таким образом, эксперименты выявили два необходимых фактора для инициирования разряда в промежутке „облако заряженного

аэрозоля–земля“: 1) напряженность внешнего электрического поля должна быть более 10 kV/cm , 2) в промежутке должна присутствовать группа достаточного крупных модельных гидрометеоров. Первое условие хорошо согласуется с экспериментальными и оценочными данными из [1,4], принимаемая во внимание высота над поверхностью земли, где значения облачного электрического поля для инициирования молнии предполагаются в диапазоне $1.5\text{--}9.5 \text{ kV/cm}$. Такие поля были зафиксированы в реальных грозовых облаках. Второе условие может быть очень важным и, более того, определяющим в существующих моделях инициирования разряда внутриоблачной и нисходящей молнии. В [9] отмечено, что стримерная корона (это необходимая стадия инициирования молнии [1,4]) могла возникать во внешних электрических полях $2.5\text{--}5.0 \text{ kV/cm}$ на сближающихся гидрометеорах, когда они достигали размеров $1\text{--}2 \text{ cm}$. Последовательное замыкание близко расположенных гидрометеоров при инициировании и распространении разряда молнии было предположено в [10] во внешних облачных полях $2\text{--}3 \text{ kV/cm}$.

5. Анализ экспериментальных токовых и оптических характеристик разряда из облака заряженного аэрозоля показал, что группа модельных гидрометеоров действительно может существенно повлиять не только на стадию инициирования разряда, но и на последующие стадии, включая главную (финальную) стадию. В случае присутствия группы модельных гидрометеоров в промежутке „заряженное аэрозольное облако–заземленный стержень на плоскости“ финальная стадия разряда становится существенно слабее по сравнению с разрядом без модельных гидрометеоров. Максимальная амплитуда тока разряда становится в $1.5\text{--}3.0$ раза меньше. Яркость излучения канала разряда существенно снижается (до $5\text{--}8$ раз). Заряд, нейтрализованный в течение финальной стадии разряда, уменьшается тоже. Однако продолжительность финальной стадии возрастает. В целом, токовые характеристики разряда между облаком заряженного водного аэрозоля и землей в присутствии модельных гидрометеоров в промежутке аналогичны характеристикам такого разряда в случае, когда в этом промежутке создается лазерная искра [8]. Характеристики разряда между заряженным аэрозольным облаком и землей для таких различных ситуаций представлены в таблице.

Такие полученные экспериментальные результаты связаны с особенностями формирования стадий разряда, предшествовавших финальной стадии (прежде всего лидерной стадии разряда). Присутствие

Характеристики финальной стадии разряда между облаком заряженного аэрозоля и землей

Характеристики (средние значения)	Чистый воздух	Гидро- метеоры	Лазерная искра
Максимальная амплитуда тока, A	13.5	7.5	5.5
Количество пиков на осциллограмме тока, μs	1–3	2–3	2–3
Продолжительность финальной стадии, μs	1.85	2.95	2.6
Заряд, нейтрализованный в течение финальной стадии, μC	4.45	3.75	3.7
Интенсивность излучения, о. е.	1	0.15	–

группы модельных гидрометеоров в промежутке „облако заряженного аэрозоля–стержневой электрод на заземленной плоскости“ ведет к облегчению условий возникновения объемного лидерного разряда, помимо восходящего лидера с заземленного стержневого электрода. В результате несколько участков объемных лидерных разрядов могут дополнительно формироваться в промежутке. Эти участки имеют разные характеристики и могут последовательно формировать финальный разряд, соединяясь в различной последовательности. Такое изменение динамики формирования финального разряда из-за возникновения нескольких лидерных участков в разрядном промежутке подтверждается следующим фактом. Введение группы крупных модельных гидрометеоров в область, непосредственно прилегающую к вершине заземленного стержневого электрода, приводило только к росту скорости формирования и распространения восходящего лидера, но практически никак не влияло на характеристики последующего финального разряда.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 05-08-50350).

Список литературы

- [1] *Rakov V.A., Uman M.A.* Lightning: Physics and Effects. Cambridge University Press, 2003.
- [2] *Gaussiat N., Sauvageot H., Illingworth A.J.* // J. of Atmospheric and Ocean Technology. 2003. V. 20. P. 1264–1275.

- [3] *Mansell E.R., Mac Gorman D.R., Ziegler C.L., Straka J.M.* // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. N 9. P. 1–14.
- [4] *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001.
- [5] *Williams E., Cooke C., Wright K.* // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. N 4. P. 6059–6070.
- [6] *Chauzy S., Kably K.* // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P. 13107–13114.
- [7] *Темников А.Г., Орлов А.В.* // Электричество. 1996. № 8. С. 18–25.
- [8] *Темников А.Г., Орлов А.В., Василяк Л.М.* и др. // Теплофизика высоких температур. 2003. Т. 41. № 2. С. 166–175.
- [9] *Schroeder V., Baker M.B., Latham J.* // Q.J. Roy. Met. Soc. 1999. V. 125. P. 1681–1693.
- [10] *Nguyen M.D., Michnowski S.* // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 26675–26680.