

# Экспериментальное моделирование системы лазерной молниезащиты на установке с искусственным облаком заряженного водного аэрозоля

В.В.Аполлонов\*, Л.М.Василяк\*\*, И.П.Верещагин\*\*\*, В.В.Глазков\*\*\*, Д.Н.Герасимов\*\*\*, И.Г.Кононов\*, А.В.Орлов\*\*\*, Д.Н.Поляков\*\*, О.А.Синкевич\*\*\*, М.В.Соколова\*\*\*, А.Г.Темников\*\*\*, К.Н.Фирсов\*

*Исследована возможность применения длинной лазерной искры для защиты объектов от ударов молнии. Найдены условия, при которых воспроизводимым образом удается направлять электрические разряды из облака вдоль части длинной лазерной искры. Установлено, что взаимодействие лазерной искры с электрическим разрядом, развивающимся со стержневого электрода (молниеотвода), приводит к уменьшению длительности вспышки стримерной короны, а также к увеличению тока сформировавшегося лидера и скорости его движения по сравнению со случаем, когда лазерная искра отсутствует.*

**Ключевые слова:** лазерная искра, молниезащита, использование лазеров.

## 1. Введение

В настоящее время проблема защиты наземных объектов от ударов молнии еще далека от окончательного решения. Особую опасность представляют удары молнии в такие промышленные предприятия, как нефтехимические комплексы, атомные станции, линии и подстанции сверхвысокого напряжения, ракетные пусковые установки и т. д. Электромагнитный импульс от близкого удара молнии приводит также к нарушению работы и выходу из строя телекоммуникационного оборудования, компьютерных сетей, систем управления. В связи с этим в настоящее время к молниезащите предъявляются повышенные требования [1, 2]. Используемые на практике традиционные системы молниезащиты не всегда способны обеспечить ее эффективность на должном уровне, что стимулирует поиск новых подходов к решению данной проблемы.

Одним из наиболее перспективных и активно развиваемых сейчас направлений в совершенствовании молниезащиты является лазерная молниезащита [3, 4], при использовании которой предполагается, что развивающийся канал разряда молнии направится к традиционному стержневому металлическому молниеотводу по плазменному каналу, созданному при оптическом пробое воздуха лазерным излучением. В этом методе используется концепция «активного» молниеотвода, когда ла-

зерный луч может служить для «поджига» и запуска положительного восходящего лидера с вершины молниеотвода к отрицательно заряженному грозовому облаку. Ожидается, что по сравнению с традиционными методами использование лазерной искры позволит эффективно управлять самим процессом защиты, обеспечит селективность перехвата молнии, а также возможность защиты высоких объектов и больших площадей.

В подавляющем большинстве экспериментальных работ влияние длинной лазерной искры на процесс развития разряда исследовалось только в электродных промежутках [5, 6], и лишь в работах [3, 7] была предпринята попытка инициирования молнии с помощью длинной лазерной искры в полевых условиях. В [7] были зарегистрированы два случая совпадения по времени удара молнии в молниеотвод с запуском лазера, однако канал молнии при этом не совпадал с каналом оптического пробоя. В то же время из экспериментов с инициированием разряда в электродных промежутках известно, что длинная лазерная искра может полностью определять развитие лидерного канала и его положение в пространстве [5]. Однако условия, при которых с помощью длинной лазерной искры можно инициировать восходящий лидер или перехватить канал молнии, неясны, и проведенные в [3, 7] полевые испытания системы лазерной молниезащиты не дали ответа на эти вопросы.

Поскольку полевые эксперименты являются весьма сложными и дорогостоящими, представляется целесообразным продолжение лабораторных исследований систем молниезащиты. Однако эти исследования необходимо проводить в условиях, более адекватно отражающих реальную грозовую ситуацию.

В настоящей работе экспериментально исследовано взаимодействие лазерной искры с разрядами, вызванными искусственным облаком заряженного водного аэрозоля. Представленный материал частично рассматривался нами в [8].

\*Институт общей физики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова 38

\*\*Институт теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур РАН, 127412 Москва, ул. Ижорская, 13/19

\*\*\*Московский энергетический институт (технический университет), Россия, 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 14

## 2. Экспериментальный комплекс

Схема экспериментального комплекса, состоящего из двух основных частей – генератора заряженного аэрозоля [9] и импульсного  $\text{CO}_2$ -лазера с энергией излучения 50 Дж [10], показана на рис.1.

Заряженное аэрозольное облако (ЗАО) создается генератором заряженного водного аэрозоля 1 конденсационного типа, в котором используется дозвуковое суживающееся сопло с диаметром концевой сечению 6 мм. При рабочих давлениях в парогенераторе 3–8 атм скорость истечения турбулентной струи пара в атмосферу составляет 400–430 м/с. Результаты измерений скорости истечения в различных сечениях заряженного турбулентного потока приведены в [9].

Зарядное устройство генератора заряженного аэрозоля обеспечивает ток выноса в диапазоне 80–150 мкА. Заряженное аэрозольное облако 3 отрицательной или положительной полярности объемом в несколько кубических метров формируется на высоте 1–3 м над заземленной металлической плоскостью 2. Потенциал ЗАО может достигать 1.5 МВ. В промежутке ЗАО–заземленная плоскость создается электрическое поле напряженностью до 12 кВ/см у заземленной плоскости и до 22 кВ/см – вблизи границ ЗАО [11, 12].

При проведении экспериментов на заземленной плоскости под ЗАО располагался стержневой электрод 4 со сферической или конической вершиной. Высота электрода могла варьироваться от 10 до 58 см, радиус кривизны его вершины – от 2 до 20 мм. Пучок  $\text{CO}_2$ -лазера направлялся таким образом, что после его отражения от вогнутого зеркала 6 с радиусом кривизны 3.6 м в промежутке ЗАО–стержень возникала длинная лазерная искра. Искра образовывалась либо в ЗАО вблизи его границ (вариант А), либо вблизи вершины стержня (вариант В). Длина лазерной искры достигала 50 см. Угол между направлением распространения искры и плоскостью горизонта мог меняться от 40 до 70°. Структура лазерной искры была прерывистой (до 15 шарообразных плазменных образований вдоль лазерного луча), обычной для длинных искр, получаемых при фокусировке лазерного излучения сферической оптикой.

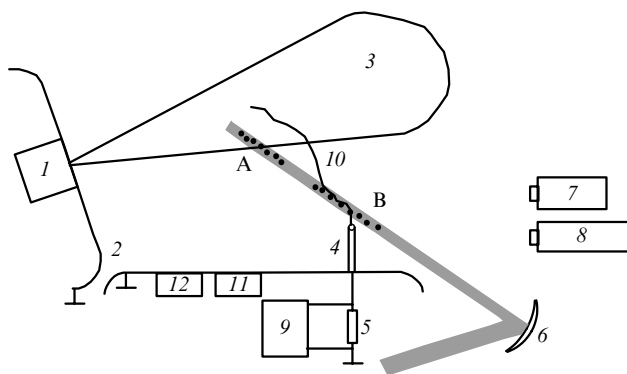


Рис.1. Схема экспериментального комплекса: 1 – генератор заряженного водного аэрозоля; 2 – заземленная плоскость; 3 – заряженное аэрозольное облако; 4 – стержневой электрод; 5 – токовый шунт; 6 – сферическое зеркало; 7 – цифровой фотоаппарат; 8 – видеокамера; 9 – прибор для измерения тока; 10 – каналный разряд; 11 – струнный датчик напряженности электрического поля; 12 – динамическая антенна; А, В – варианты положения лазерной искры.

Измерительная часть экспериментального комплекса включала в себя малоиндуктивные токовые шунты 5 (10 и 4 Ом) для измерения тока разряда в промежутке ЗАО–стержень, сигнал с которых подавался на осциллограф 9 (Tektronix TDS 220). Оптическая картина длинной лазерной искры и каналных разрядов 10 в этом промежутке фиксировалась цифровым фотоаппаратом 7 и видеокамерой 8. Напряженность электрического поля, создаваемого ЗАО, контролировалась установленным на заземленной плоскости 2 струнным датчиком 11. Изменение заряда облака вследствие возникновения разрядных явлений отслеживалось динамической антенной 12, сигнал с которой подавался на запоминающий осциллограф С8-17.

## 3. Экспериментальные результаты и их анализ

В настоящей работе представлены результаты экспериментов, полученные при отрицательной полярности ЗАО, т. к. именно эти условия наиболее характерны для реальной грозовой ситуации в наших климатических условиях.

Эксперимент проходил следующим образом. Заряд ЗАО наращивался до значения, при котором создаваемое им электрическое поле в промежутке ЗАО–стержень оказывалось достаточным для возникновения восходящих разрядов с вершины стержня. Лазер запускался вручную, и длинная лазерная искра в промежутке создавалась в произвольные по отношению к разрядным процессам между облаком и стержнем на плоскости моменты времени.

Серии экспериментов были выполнены для двух положений лазерной искры в разрядном промежутке (А и В, рис. 1) и двух высот стержня на плоскости (58 и 29 см). Давление, температура и относительная влажность воздуха составляли 748 мм рт. ст., 18 °С и 70 % соответственно.

При образовании искры вблизи вершины стержневого электрода (вариант В, высота стержня 58 см, напряженность электрического поля ЗАО вблизи вершины стержня 12–16 кВ/см) была выявлена существенная корреляция возникновения лазерной искры и развития основного разряда между облаком и стержнем на плоскости. В этом случае часть лидерного канала основного разряда в окрестности вершины стержня развивалась вдоль участка лазерной искры (рис.2). Характерно, что в



Рис.2. Фотография разряда с лазерной искрой в промежутке.

направлении лидерного разряда задействована не вся искра, а только ее часть, причем с не самой высокой плотностью плазменных образований на единицу длины. Участок искры вблизи границы ЗАО в этом процессе не участвует. Типичная осциллограмма протекающего через стержень тока разряда в случае «захвата» его канала лазерной искрой показана на рис.3. На осциллограмме видны все стадии развития разряда: вспышка стримерной короны через ~2 мкс после оптического пробоя, которая трансформируется в лидер в течение 2–4 мкс, и следующая за лидером через 1–3 мкс стадия главного разряда длительностью ~1 мкс.

При уменьшении высоты стержня до 29 см (искра также формируется в зоне В, напряженность электрического поля вблизи вершины стержня 10–14 кВ/см) зарегистрированы лишь единичные акты «захвата» канала разряда лазерной искрой. В этом случае даже при «захвате» длительности всех стадий разряда были заметно больше, чем на осциллограмме рис.3.

При расположении лазерной искры в области А, несмотря на высокую (16–20 кВ/см) напряженность электрического поля в этой зоне, не наблюдалось связи между появлением лазерной искры и возникновением и развитием разряда при всех высотах стержневого электрода (всего для этого случая было произведено 20 запусков лазера).

С целью выявления роли лазерной искры в развитии разряда была проведена серия экспериментов по исследованию разрядов в промежутке ЗАО–стержень без лазерной искры. Типичная осциллограмма протекающего в таком случае через стержень тока разряда показана на рис.4. На этой осциллограмме хорошо видны все этапы его развития – вспышка короны, лидерная и главная стадии, но их продолжительность намного больше по сравнению со случаем, когда в промежутке присутствует лазерная искра (см. рис.3).

Сравнение характеристик разрядов в промежутке ЗАО–стержень, получаемых в присутствии в промежутке лазерной искры и без нее, и анализ условий их развития показали, что лазерная искра, создаваемая у вершины заземленного электрода, не способствует возникновению восходящих лидерных разрядов, если электрическое поле облака меньше, чем требуется для развития разряда в отсутствие искры. И только при больших зарядах облака, когда электрическое поле ЗАО и без искры способно

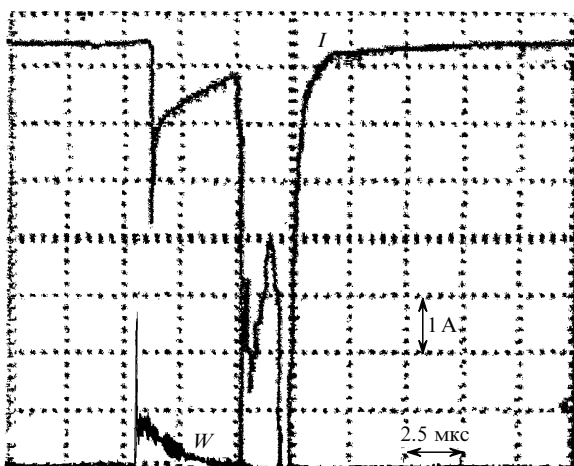


Рис.3. Осциллограммы тока разряда  $I$  в присутствии лазерной искры (верхний луч) и форма импульса генерации лазера  $W$  (нижний луч).

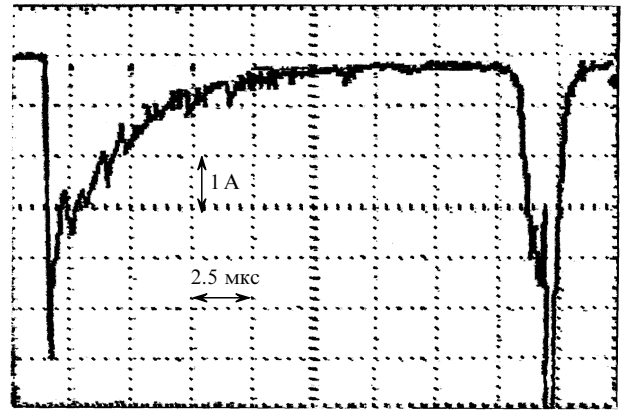


Рис.4. Осциллограмма тока разряда  $I$  в отсутствие лазерной искры.

инициировать восходящий лидер, отмечена достаточно высокая вероятность «захвата» канала последнего лазерной искрой. Следовательно, возникновение лидера как при наличии лазерной искры, так и в ее отсутствие происходит при близких значениях напряженностей внешнего электрического поля, создаваемого ЗАО. Однако длинная лазерная искра, образуемая у заземленного электрода, может ускорить процесс формирования устойчивого лидера и его развития в сторону ЗАО.

Результаты обработки осциллограмм тока разрядов, «захваченных» лазерной искрой, и разрядов, наблюдаемых без лазерной искры, приведены в табл.1. Из нее следует, что образование лазерной искры вблизи вершины стержневого электрода приводит к уменьшению продолжительности вспышки стримерной короны до ее пере-

Табл.1. Характеристики лидерных разрядов при наличии лазерной искры в промежутке и в ее отсутствие.

Измеряемые параметры	Средние значения измеренных величин и диапазон их разброса	
	в присутствии лазерной искры	без лазерной искры
Продолжительность вспышки стримерной короны до возникновения лидера $T_{cor}$ (мкс)	2.37	7.2
	1.22–5.88	4.2–11.2
Максимальный ток стримерной короны $I_{cor}$ (А)	3.37	3.95
	1.88–5.0	2.46–5.0
Заряд коронной вспышки $Q_{cor}$ (мкКл)	5.0	6.7
	2.07–15.8	2.8–14.8
Средний ток лидера $I_{lead}$ (А)	1.52	0.11
	0.93–3.07	0.08–0.15
Длительность стадии лидерного тока $T_{lead}$ (мкс)	1.25	13.0
	0.68–2.07	5.6–22.9
Заряд лидера $Q_{lead}$ (мкКл)	1.8	1.68
	0.84–3.68	0.4–2.6
Амплитуда тока главного разряда $I_m$ (А)	5.0	4.9
	4.4–5.4	4.2–5.3
Продолжительность стадии главного разряда $T_m$ (мкс)	1.05	3.4
	0.75–1.61	2.23–6.25
Заряд аэрозольного облака, нейтрализуемый на стадии главного разряда, $Q_n$ (мкКл)	3.64	5.76
	2.38–6.05	2.49–8.21
$Q_n/Q_{lead}$	2.28	6.7
	0.98–3.79	1.1–22.6

хода в лидерный разряд  $T_{\text{cor}}$  в несколько раз, в то время как максимальный ток стримерной короны  $I_{\text{cor}}$  и переносимый ею заряд  $Q_{\text{cor}}$  уменьшаются в среднем всего лишь на 30%. Сама же связь между продолжительностью вспышки стримерной короны и протекающим зарядом для разрядов с лазерной искрой и без нее имеет в целом схожий характер. Можно предположить, что присутствие лазерной искры вблизи вершины стержневого электрода в зоне стримерной короны ускоряет процесс ее перехода в первый участок лидера.

Скорость распространения лидера под влиянием лазерной искры увеличивается почти на порядок, и длительность лидерной стадии разряда  $T_{\text{lead}}$  за счет этого сокращается с 13 до 1.25 мкс. В свою очередь средний ток лидера в присутствии в промежутке лазерной искры на порядок больше, чем без нее (в среднем более 1.5 А против 0.11 А). В результате общий заряд лидера для обоих случаев оказывается практически одинаковым.

Таким образом, при распространении лидерного разряда лазерная искра выступает «ускорителем», если возникший лидер ею захватывается. Лазерная искра может в несколько раз увеличить среднюю скорость распространения лидера. Это согласуется с результатами [5, 6], где установлено, что присутствие в разрядном промежутке длинной лазерной искры позволяет увеличить скорость распространения лидера более чем на порядок по сравнению с его скоростью в невозмущенном промежутке. Характерно, что промежуток перекрывается тем быстрее, чем больший участок лазерной искры совпадает с каналом лидера.

Данный эффект хорошо прослеживается и в настоящих экспериментах при увеличении длины разрядного промежутка ЗАО – стержень за счет уменьшения (от 58 до 29 см) высоты стержня, расположенного на заземленной плоскости. Несмотря на развитие восходящего лидера по участку лазерной искры, это привело к увеличению среднего времени его распространения  $T_{\text{lead}}$  от 1.25 до 5.7 мкс, поскольку увеличивается общая длина зазора и уменьшается промежуток, занятый лазерной искрой.

В присутствии искры в промежутке и без нее существенно различаются также параметры главного разряда: хотя амплитуды тока главного разряда в обоих случаях

составляют 4–5 А (см. табл.1), длительность стадии главного разряда  $T_m$  и нейтрализуемый за это время заряд  $Q_n$  уменьшаются при «захвате» разряда более чем вдвое. В обоих случаях наблюдается практически одинаковый характер роста продолжительности стадии главного разряда  $T_m$  с увеличением времени распространения лидера  $T_{\text{lead}}$ , (рис.5).

Несмотря на сходство в характере роста  $T_m$  с увеличением  $T_{\text{lead}}$ , зависимости заряда, нейтрализуемого на стадии главного разряда ( $Q_n$ ), от заряда лидера  $Q_{\text{lead}}$  имеют для разрядов с искрой и без нее выраженный противоположный характер. В отсутствие искры наблюдается явная тенденция к уменьшению  $Q_n$  с увеличением заряда лидера  $Q_{\text{lead}}$ . В ее присутствии, наоборот, проявляется слабый рост  $Q_n$  с увеличением заряда лидера  $Q_{\text{lead}}$ . Необходимо отметить, что доля заряда, оставленного лидером в общем заряде, который нейтрализуется на стадии главного разряда ( $Q_n/Q_{\text{lead}}$ ), для разрядов без лазерной искры в промежутке намного меньше, чем при ее наличии (в среднем при наличии искры  $Q_n/Q_{\text{lead}} \approx 6.7$  и без нее – 2.28), особенно при малых зарядах лидера. Причем при больших зарядах лидера при всех условиях на стадии главного разряда практически нейтрализуется только заряд, оставленный предшествующим лидером, т. е.  $Q_n/Q_{\text{lead}} \rightarrow 1$ .

#### 4. Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показали, что создаваемая вблизи заземленного электрода длинная лазерная искра, несмотря на прерывистую структуру, может перехватить канал лидерного разряда, развивающегося от электрода к заряженному аэрозольному облаку. Перехват происходит при достаточно высокой напряженности электрического поля у электрода, близкой к значению поля, необходимому для возникновения восходящего положительного лидера в отсутствие в промежутке лазерной искры.

Создание лазерной искры вблизи вершины заземленного электрода позволяет в несколько раз сократить время формирования устойчивого лидера, который, начиная свое движение в сторону облака, захватывает часть лазерной искры, вследствие чего возрастает скорость его продвижения по сравнению со случаем, когда разряд развивается в отсутствие в промежутке лазерной искры. Указанное обстоятельство является принципиально важным для систем лазерной молниезащиты. Действительно, развивающийся с вершины молниеотвода лидерный разряд, благодаря взаимодействию с лазерной искрой, вполне может опередить в своем продвижении в сторону приближающегося нисходящего лидера восходящие разряды с защищаемого объекта, перехватить нисходящий лидер и тем самым защитить объект.

Данная работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (проект № 880-99).

1. International Electrotechnical Commission standard: IEC 1024-1 (1990). Protection of structures against lightning. Part 1: General Principals.
2. International Electrotechnical Commission standard: IEC 1312-1 (1994). Protection against lightning electromagnetic impulse (LEMP). Part 1: General Principals.
3. Yamanaka T., Uchida S., Shimada Y., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3343**, 281 (1998).
4. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. *УФН*, **170**, 753 (2000).

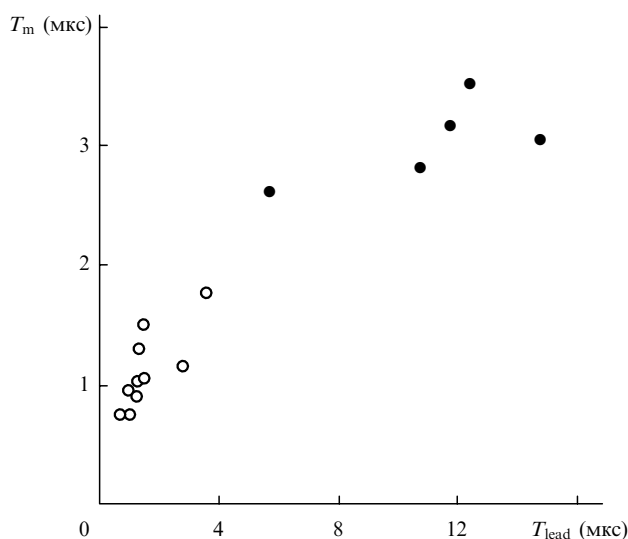


Рис.5. Зависимость продолжительности стадии главного разряда  $T_m$  от длительности протекания лидерного тока  $T_{\text{lead}}$  в присутствии лазерной искры (○) и в ее отсутствие (●).

5. Василяк Л.М. *Материалы Конференции по физике низкотемпературной плазмы ФНТП-98* (Петрозаводск, 1998, ч. 2, с. 135).
6. Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Поляков Д.Н. *Электричество*, **1**, 59 (1991).
7. Учидэ Ш., Шимура Е., Ясуда Х. и др. *Оптич. ж.*, **66**, № 3, 36 (1999).
8. Apollonov V.V., Firsov K.N., Gerasimov D.N., Glazkov V.V., Kononov I.G., Orlov A.V., Polyakov D.N., Sinkevich O.A., Sokolova M.V., Temnikov A.G., Vasilyak L.M., Vereschagin I.P. *Proc. XXV Intern. Conf. Phenomena in Ionized Gases* (Nagoya, Japan, 2001, v.4, p.65).
9. Vereschagin I.P., Antsupov K.V., Bazutkin V.V., Beloglovsky A.A., Makalsky L.M., Nikitin O.A., Sysoev V.S., Temnikov A.G. *Proc. XXI Intern. Conf. on Lightning Protection* (Berlin, Germany, 1992, с. 25).
10. Apollonov V.V., Baitur G.G., Ermachenco A.V., Firsov K.N., Kononov I.G., Konev V.M., Kowalchuk O.B., Kralin V.V., Minenkov V.R., Prokhorov A.M., Semenov S.K., Shubin B.G., Yamschikov V.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **8**, № 2, 220 (1991).
11. Темников А.Г., Орлов А.В. *Электричество*, **8**, 18 (1996).
12. Vereschagin I.P., Temnikov A.G., Koshelev M.A., Makalsky L.M. *Proc. IX Intern. Symp. on High Voltage Engineering* (Graz, Austria, 1995, p. 2165).