

УДК 537.523+527

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВСТРЕЧНОГО ЛИДЕРА И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА МОЛНИЕЗАЩИЩЁННОСТЬ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ЛАБОРАТОРНОГО КРУПНОМАСШТАБНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*В. С. Сысоев*<sup>1,2</sup>, *А. Ю. Костинский*<sup>1,2,3</sup>, *Л. М. Макальский*<sup>1</sup>, *В. А. Раков*<sup>2</sup>,  
*М. Г. Андреев*<sup>1</sup>, *М. У. Булатов*<sup>1,2</sup>, *Д. И. Сухаревский*<sup>1,2</sup>, *М. Ю. Наумова*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Всероссийский электротехнический институт, г. Москва;

<sup>2</sup> Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;

<sup>3</sup> Высшая школа экономики, г. Москва, Россия

В работе приводятся результаты экспериментов по инициации восходящих и нисходящих лидеров при развитии длинной искры при исследовании молниезащищённости объектов на крупномасштабных моделях. Обсуждается влияние встречных лидеров на процесс поражения молнией наземных и изолированных объектов. В первом случае восходящий отрицательный лидер инициируется положительным нисходящим лидером, который распространяется с высоковольтного электрода генератора Маркса в промежутке с длиной 9÷12 м типа «стержень—стержень» (стержень расположен на плоскости, имеет высоту 3 м). Импульс положительного напряжения с длительностью 7500 мкс имел амплитуду до 3 МВ. Во втором случае инициация положительного восходящего лидера осуществлялась в электрическом поле, созданном облаком отрицательно заряженного аэрозоля, которое моделирует заряженную грозовую ячейку. В этом случае в образующемся искровом разряде с длиной 1,5÷2,0 м наблюдаются все фазы, характерные для восходящих молний, инициированных высотными наземными объектами, и триггерных молний при экспериментах с реальным грозовым облаком. Приведены основные параметры встречного лидера, зарождающегося на объектах при проведении крупномасштабных модельных экспериментов с длинной искрой.

### ВВЕДЕНИЕ

Современные системы молниезащиты как наземных объектов, так и летательных аппаратов не вполне удовлетворяют возросшим требованиям по надёжности. Например, как показывает российский и мировой опыт эксплуатации линий сверхвысоких напряжений (1000 кВ и выше), главной причиной их отключений являются прорывы молний сквозь тросовую защиту (90% от общего числа отключений). Это заставляет искать пути улучшения молниезащиты объектов.

Современные данные о развитии разряда молнии показывают, что ключевые для молниезащиты сегменты траектории лидера молнии (в частности «выбор» точки поражения объекта) существенным образом зависят от конкуренции встречных восходящих лидеров, которые могут стартовать как от защищаемого объекта, так и от молниеприёмников. Поэтому для совершенствования методик расчёта эффективности молниезащитных систем важны знание условий возникновения встречного лидера и его параметров. Встречный лидер, как правило, оказывает сильное влияние на выбор точки поражения молнией объекта, а также влияет на такие значимые параметры молниепоражения, как радиус поражения и высота ориентировки. Учёт встречного лидера становится необходимым для совершенствования стандартов по молниезащите как для заземлённых, так и для изолированных объектов, например летательных аппаратов.

В настоящее время много данных о встречных лидерах получено при проведении экспериментов с триггерными молниями [1]. Однако в натуральных условиях регистрация большого числа параметров встречного лидера, в силу технических трудностей при измерениях и относительной малочисленности событий, сильно затруднена. Поэтому получение новых данных о встречном

лидере при экспериментах с длинной искрой как аналоге некоторых стадий молниевых разрядов в лабораторных условиях является важным дополнением к натурным наблюдениям молнии.

Следует отметить следующее обстоятельство. Зоны защиты молниевых отводов в национальных стандартах по молниезащите [2] слабо подкреплены результатами систематических макетных испытаний, на что было указано в работе [3]. Последние работы такого рода выполнялись более полувека назад с промежутками метровой длины. В них условия развития искрового разряда, моделирующего молнию, принципиально отличались от характерного для молнии разряда в атмосферных промежутках километровой длины. К тому же большинство лабораторных экспериментов было выполнено при положительном напряжении. Однако более 90 % молний отрицательны и характеризуются ступенчатым развитием нисходящего лидера в отличие от непрерывного развития положительного лидера. В последнее время предприняты попытки восполнить этот пробел. Так, в результате проведённых крупномасштабных испытаний объектов на длинной искре [3] установлено существенное несоответствие полученных зон защиты типовых молниеприёмников расчётным значениям по нормативным документам. Такое несоответствие было найдено как для отрицательной, так и для положительной искры.

С другой стороны, было подтверждено [3], что при крупномасштабных испытаниях для положительной искры (длина промежутка 9÷12 м) процесс поражения объекта или молниеприёмника длинной искрой происходит с возникновением встречного лидера. При этом фоторегистрация траекторий разряда указывает на то, что встречный лидер оказывает на этот процесс существенное влияние. Аналогичные результаты (т. е. возникновение встречного лидера и его влияние на процесс поражения) получены для крупномасштабных испытаний изолированных объектов (моделей летательных аппаратов). Таким образом, появляются основания предположить, что учёт встречного лидера позволит уточнить методику расчёта эффективности защиты от прямых ударов молнии различных (наземных и изолированных) объектов.

В настоящей работе приводятся результаты модельных экспериментов по измерениям параметров разряда при инициации восходящих и нисходящих лидеров при развитии длинной искры.

В первом случае восходящий отрицательный лидер инициируется положительным нисходящим лидером, который распространяется с высоковольтного электрода генератора Маркса в промежутках с длиной 9÷12 м типа «стержень—стержень» (второй из них имеет высоту 3 м и расположен на плоскости) и «стержень—провод» (высота провода над плоскостью равна 3 м). Такой способ исследования зон защиты молниезащитных устройств с использованием положительной искры в лабораторных условиях является традиционным. Импульс испытательного напряжения с длиной фронта 100 мкс и с длительностью последующего до половинного уровня 7500 мкс имел амплитуду до 3 МВ. В этих исследованиях изучалось влияние геометрических характеристик объектов на процесс возникновения встречного лидера и его основные параметры с помощью крупномасштабных экспериментов на моделях с длинной искрой. Сравнивались эффективности молниеприёмников в виде стержневого электрода и горизонтального троса, расположенного на такой же высоте, что и кончик стержня [3].

В данной работе получены данные об основных параметрах процесса возникновения и развития встречного лидера в экспериментах с длинной искрой. Показано, что защитная эффективность тросового молниеприёмника существенно выше, чем у стержневого. Это может быть обусловлено тем, что на тросовом молниеприёмнике реализуются более благоприятные условия для возникновения встречного лидера, что позволяет более эффективно перехватывать нисходящий искровой разряд.

Во втором случае инициация положительного восходящего лидера осуществлялась в электрическом поле, созданном облаком отрицательно заряженного аэрозоля. В этом случае положительный восходящий лидер возбуждается полем отрицательного заряженного аэрозоля. Получены

основные характеристики встречного восходящего положительного лидера.

Выбор способа инициации положительного встречного лидера с помощью модели грозовой ячейки с использованием сильнозаряженного водного аэрозоля [4, 5] было обусловлено тем, что измерение параметров встречного положительного лидера и набор необходимого статистического материала в этом случае технически значительно проще, чем в экспериментах с генератором Маркса [3]. При этом, как было показано ранее [6–9], в таких экспериментах с заряженным аэрозолем наблюдаются все основные фазы развития длинной искры: первичная вспышка стримерной короны, главная фаза продвижения лидера, обратный удар. Это подтвердили и экспериментальные данные, полученные в данной работе.

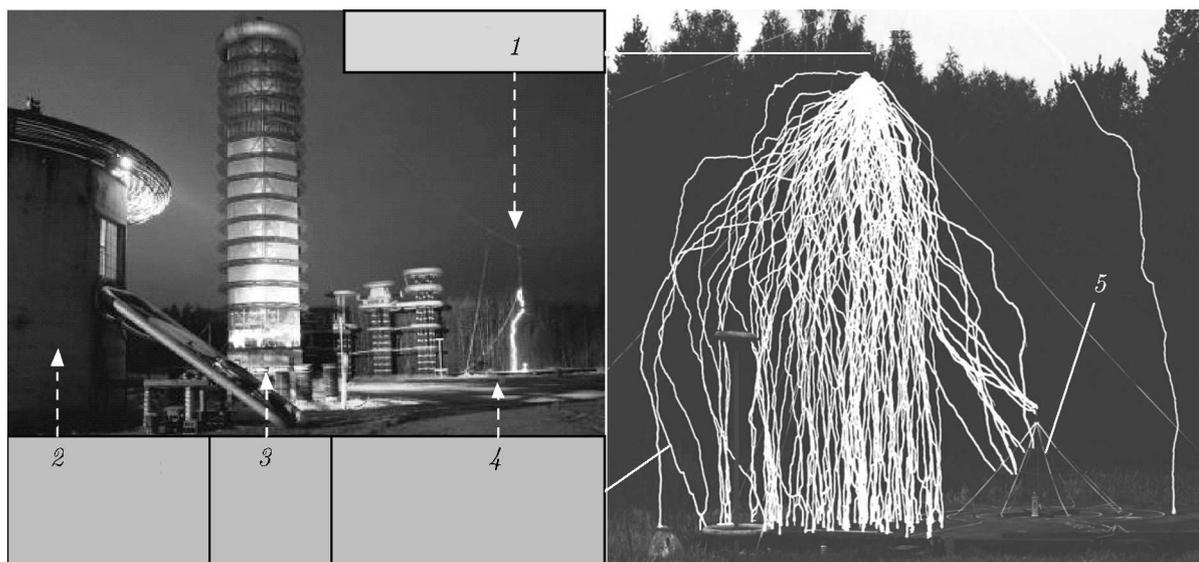


Рис. 1. Испытания с генератором Маркса с молниеприёмником в виде стержня с высотой 3 м: 1 — высоковольтный электрод, 2 — пультовая камера с регистрирующими приборами, 3 — генератор Маркса, 4 — испытательная площадка с моделями молниезащитных систем, 5 — стержень с высотой 3 м

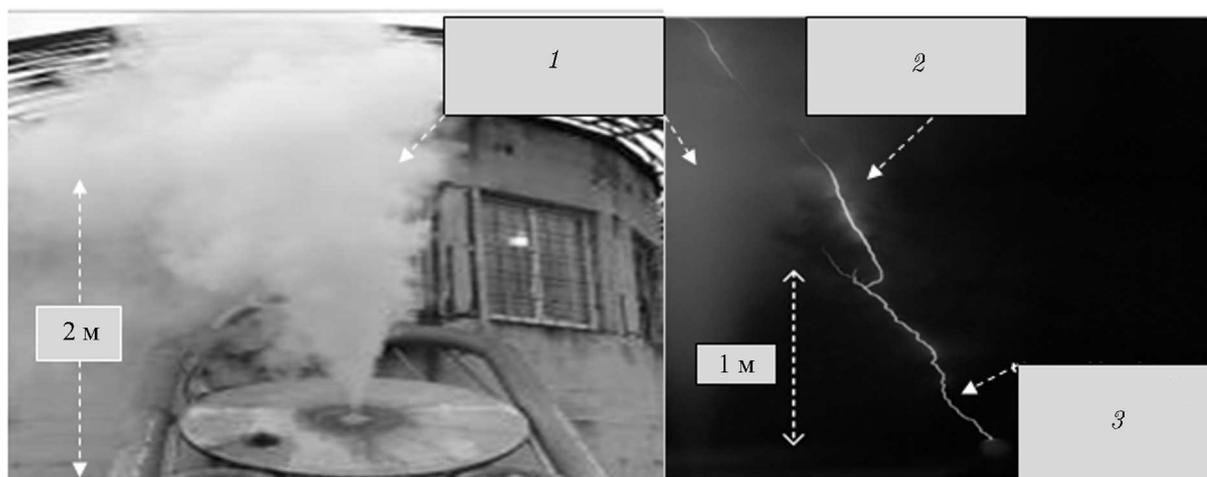


Рис. 2. Исследование встречных лидеров с помощью модели грозовой ячейки: 1 — облако заряженного аэрозоля, 2 — нисходящий отрицательный лидер, 3 — восходящий положительный лидер

## 1. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Эксперименты проводились на уникальных установках Комплексного высоковольтного стенда Всероссийского электротехнического института (г. Истра) [10]. На рис. 1 приведены фотографии первой испытательной установки — генератора Маркса с испытываемыми системами молниезащиты на испытательной плоскости. На рис. 2 — фотографии модели грозовой ячейки с примером искрового разряда, развивающегося в поле сильнозаряженного аэрозоля. Фотографии искровых разрядов с встречными лидерами получены с помощью высокочувствительных цифровых фотокамер. Временные параметры разряда (в том числе встречных лидеров) определялись с помощью электронно-оптического преобразователя ФЭР-14, работающего в режиме стрик-камеры. Описание измерительных схем приведено в [5].

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### 2.1. Генератор Маркса

В проведённых экспериментах исследовалось влияние встречных лидеров, возникающих с заземлённых и изолированных объектов, на процесс их молниепоражаемости и измерялись их временные и пространственные параметры. Длина испытательного промежутка составляла  $9 \div 12$  м.

На рис. 3 и 4 приведены типичные фотографии искровых разрядов и встречных лидеров, возникающих с испытываемых объектов на земле и с изолированных объектов. На рис. 5 и 6 соответственно показаны характерные токовые характеристики нисходящего положительного лидера

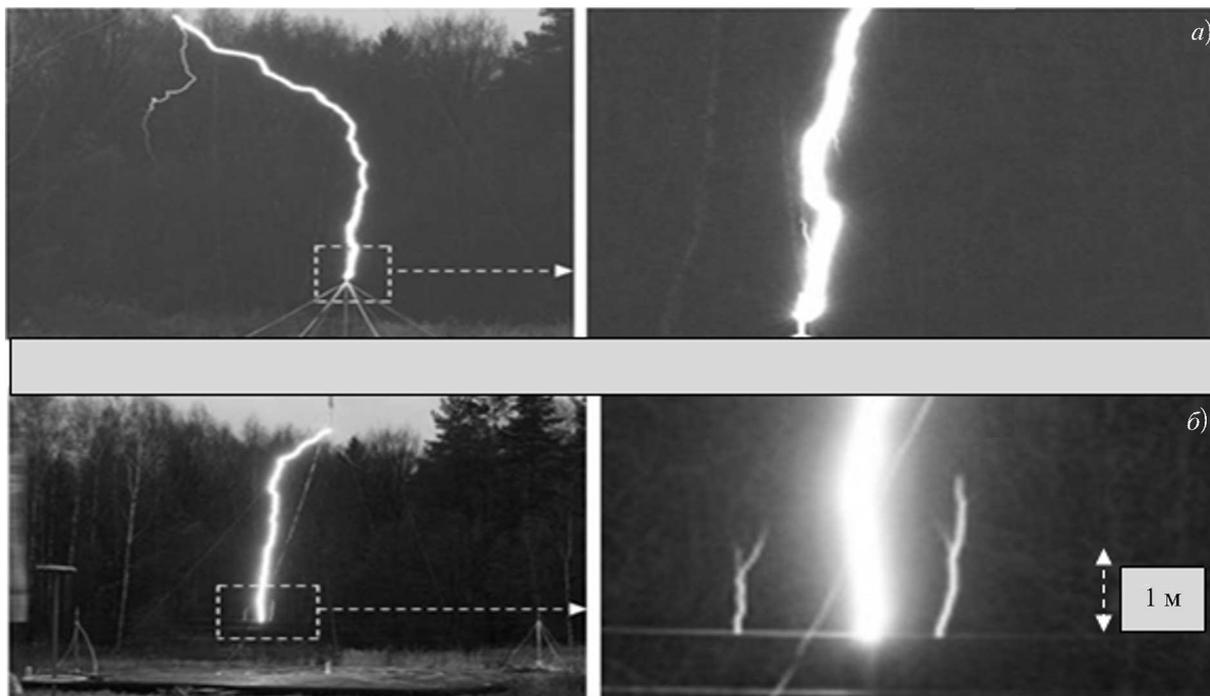


Рис. 3. Фотографии встречных лидеров с заземлённых объектов, зафиксированных при испытаниях с генератором Маркса: (а) — промежуток типа стержень—стержень (второй из них имеет высоту 3 м и расположен на плоскости), (б) — промежуток типа стержень—провод (высота провода над плоскостью равна 3 м)

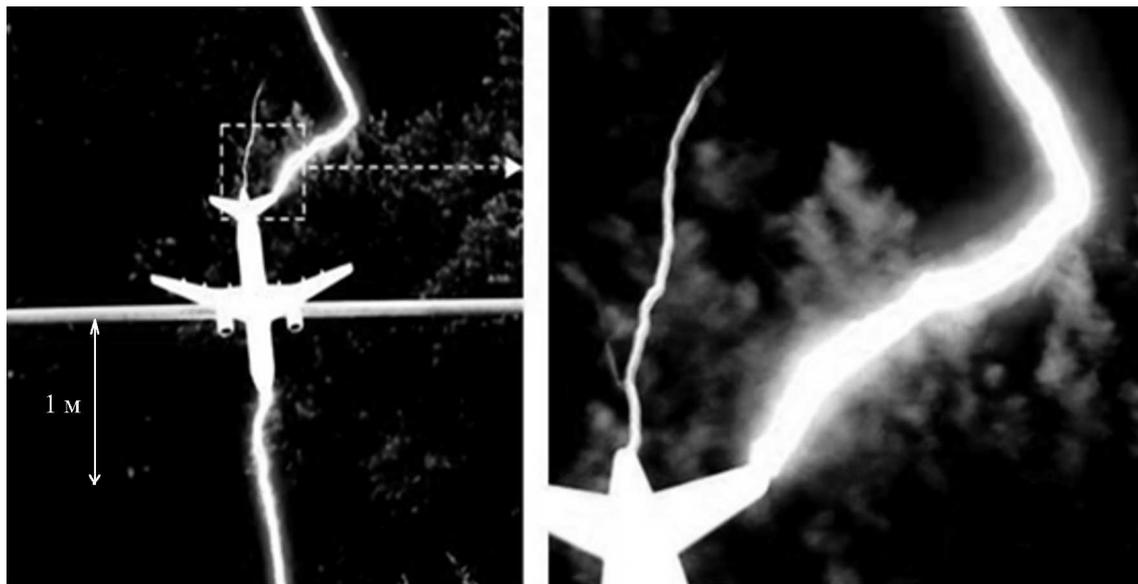


Рис. 4. Фотографии встречных лидеров с изолированного объекта, зафиксированных при испытаниях с помощью генератора Маркса

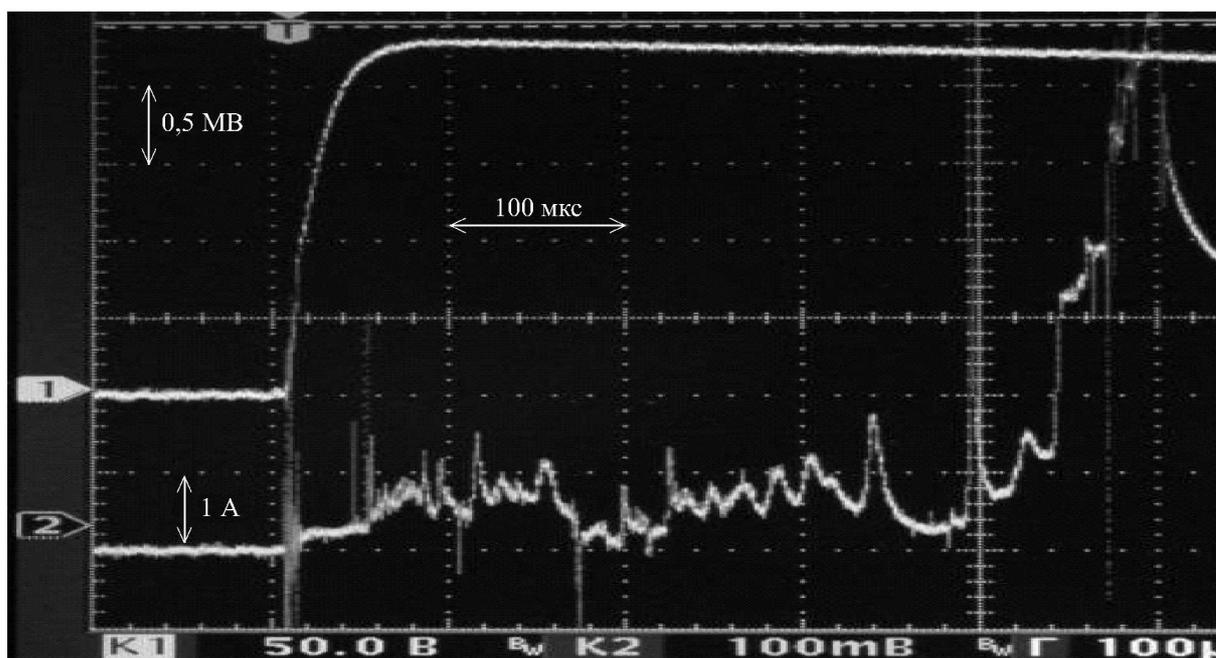


Рис. 5. Осциллограмма тока нисходящего положительного лидера с высоковольтного стержневого электрода: верхний луч — напряжение на промежутке (цена деления 0,5 МВ), нижний луч — ток встречного лидера (цена деления 1 А), цена деления для оси времени равна 100 мкс

(измерения на потенциальном электроде) и встречного отрицательного лидера, развивающегося с заземлённого стержневого объекта.

После полного пробоя промежутка (на рис. 6 это момент времени, когда напряжение упало до нуля) возникает резкое усиление тока, которое можно интерпретировать как обратный удар. Он развивается на фоне начала разряда ёмкостей генератора Маркса, что затрудняет измерение

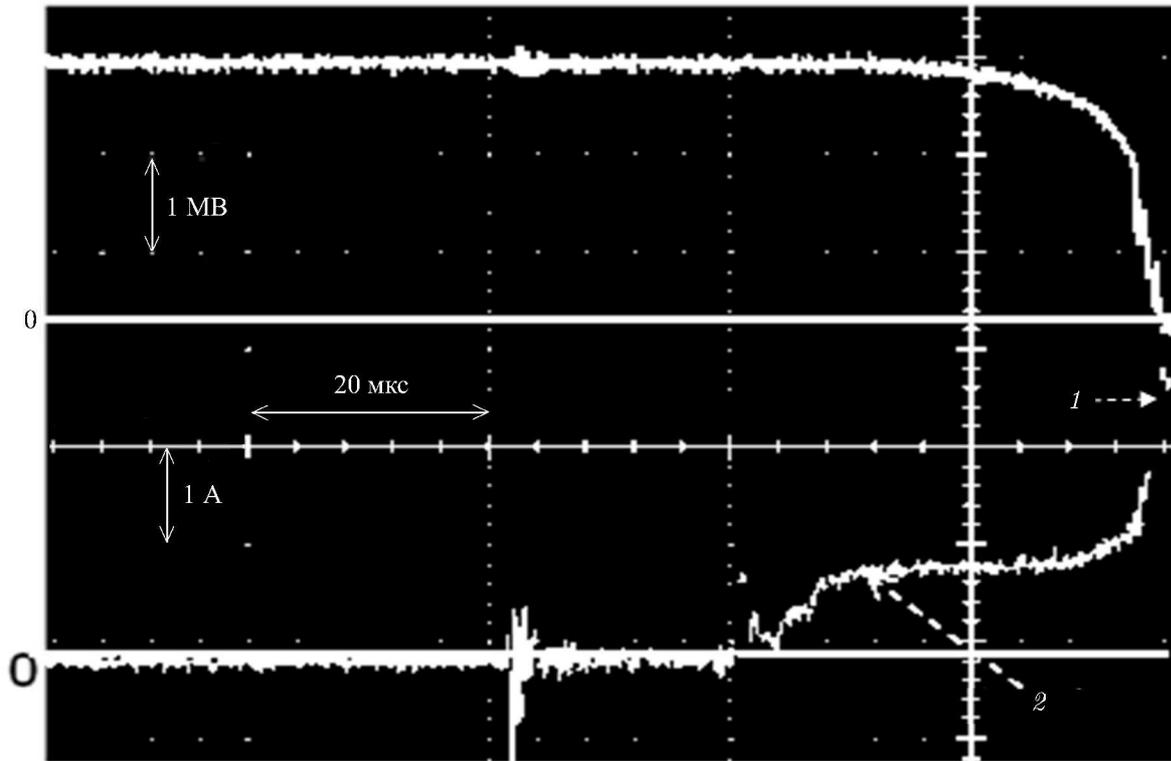


Рис. 6. Осциллограмма тока восходящего отрицательного лидера с заземлённого стержневого электрода: верхний луч — напряжение на промежутке (цена деления 1,0 МВ), нижний луч — ток встречного лидера (цена деления 1 А), 1 — фаза обратного удара, 2 — встречный лидер

его параметров. Осциллограммы тока встречного лидера с заземлённого стержневого объекта и напряжение на разрядном промежутке позволяют получить основные электрические характеристики разряда в длинной искре со встречными лидерами. Обработка осциллограмм тока с учётом длин встречного лидера, полученных из фотографий разряда, приводит к характерной величине его погонного заряда порядка 30 мкКл/м. Полученная оценка скорости встречного отрицательного лидера даёт значение порядка 3 см/мкс.

В результате сравнительных испытаний эффективности молниезащиты молниеприёмников в виде вертикального стержня и троса показали, что тросовый молниеприёмник имеет существенно более высокую эффективность. Установлено, что вероятность прорыва молнии в зону защиты обоих типов молниеприёмников (особенно стержневого), найденные в эксперименте, значительно отличаются от расчётов по стандарту [2]. Возможно, что такое значительное расхождение со стандартами может быть обусловлено их несовершенством из-за того, что при расчётах зон защиты не учитываются встречные лидеры с объектов. Данное обстоятельство требует проведения дополнительных исследований, конечной целью которых может быть совершенствование действующих стандартов по молниезащите, связанное с учётом встречных лидеров.

## 2.2. Модель грозовой ячейки

Описание модели грозовой ячейки и измерительных систем дано в [5]. На рис. 7 представлены синхронные осциллограммы разряда и тока встречного восходящего положительного лидера, развивающегося в область отрицательно заряженного аэрозоля.

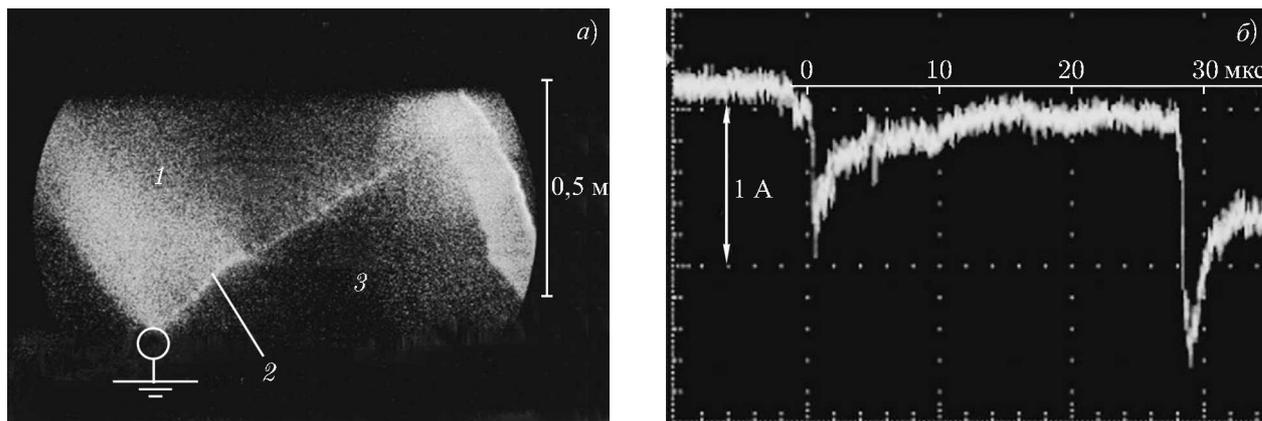


Рис. 7. Синхронные развёртки оптического свечения (а) и тока встречного положительного лидера (б) при экспериментах с заряженным аэрозолем: 1 — стримерная зона, 2 — головка канала, 3 — канал лидера

Обработка синхронных осциллограмм для встречного положительного лидера даёт заряд на единицу его длины порядка 15 мкКл/м. Проведённые измерения напряжённости электрического поля вблизи канала встречного лидера дали значение порядка 5 кВ/см, характерное для поля, необходимого для устойчивого распространения положительных стримеров, в частности в стримерной зоне положительного лидера. Скорость развития восходящего положительного лидера составила  $1,5 \div 2$  см/мкс при силе тока на главной стадии 0,1 А.

Следует отметить, что в экспериментах по моделированию процессов в искровом разряде с длиной промежутка  $1,5 \div 2,0$  м наблюдаются все фазы разряда, характерные для восходящих молний, инициированных наземными объектами и триггерных молний в экспериментах с грозовым облаком.

## ВЫВОДЫ

Проведённые эксперименты показали, что в лабораторных условиях с использованием специальных испытательных установок возможно физическое моделирование процессов возникновения и развития встречных лидеров как с заземлённых, так и с изолированных объектов. При этом регистрируются характерные фазы развития встречных лидеров, наблюдаемые в экспериментах с инициацией молний наземными сооружениями и ракетами с заземлённым проводом.

С помощью стрик-камеры ФЭР-14 получены временные развёртки положительного встречного лидера, движущегося в облако отрицательно заряженного аэрозоля. Измерены важные электрические и оптические параметры встречных лидеров (ток, заряд на единицу длины, напряжённость электрического поля, скорость движения) в лабораторных экспериментах с использованием высоковольтного генератора Маркса (длинная искра) и модели грозовой ячейки (т. е. облака заряженного аэрозоля).

Полученные данные вносят вклад в понимание процессов возникновения и развития встречных лидеров в реальных разрядах молнии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» (госконтракт 11.519.11.5017) и Правительства Российской Федерации (договор 14.В25.31.0023).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rakov V., Uman M. *Lightning: physics and effects*. Cambridge University Press, 2003. 698 p.
2. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. СО-153.-34.21.122-2003. М.: Изд-во МЭИ, 2004.
3. Базелян Э. М., Гайворонский А. С., Сысоев В. С. // Сб. докл. III Росс. конф. по молниезащите. Санкт-Петербург, 22–23 мая 2012г.
4. Андреев М. Г., Базелян Э. М., Булатов М. У. и др. // *Физика плазмы*. 2008. Т. 34, № 7. С. 1.
5. Syssoev V. S., Kostinsky A. Ju., Bulatov M. U., et al. // 7th Asia-Pacific Int. Conf. Lightning, November 1–4, 2011, Chengdu, China. 2011. P. 297.
6. Верещагин И. П., Кошелев М. А., Макальский Л. М., Сысоев В. С. // *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт*. 1989. № 4. С. 100.
7. Анцупов К. В., Верещагин И. П., Кошелев М. А. и др. // *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт*. 1990. № 4. С. 158.
8. Анцупов К. В., Верещагин И. П., Петров Н. И., Сысоев В. С. // *Письма в журн. техн. физики*. 1991. Т. 17, вып. 18. С. 80.
9. Анцупов К. В., Верещагин И. П., Темников А. Г. и др. // IX Международ. конф. по атмосферному электричеству, ГГО им. А. Е. Воейкова, 1992.
10. <http://vei-istra.ru/ru/vnitzveidirectionsofwork/investigationatmosphericelectricity/>.

Поступила в редакцию 6 мая 2013 г.; принята в печать 10 декабря 2013 г.

**A STUDY OF PARAMETERS OF THE COUNTERPROPAGATING LEADER  
AND ITS INFLUENCE ON THE LIGHTNING PROTECTION OF OBJECTS  
USING LARGE-SCALE LABORATORY MODELING**

*V. S. Syssoev, A. Yu. Kostinskiy, L. M. Makalskiy, A. V. Rakov, M. G. Andreev, M. U. Bulatov,  
D. I. Sukharevsky, and M. Yu. Naumova*

In this work, the results of experiments on initiating the ascending and descending leaders during the development of a long spark when studying lightning protection of objects with the help of large-scale models are shown. The influence of the counterpropagating leaders on the process of the lightning strike of ground-based and insulated objects is discussed. In the first case, the ascending negative leader is initiated by the positive descending leader, which propagates from the high-voltage electrode of the “rod-rod”-type Marx generator (the rod is located on the plane and is 3-m high) in the interval with a length of 9–12 m. The positive-voltage pulse with a duration of 7500  $\mu$ s had an amplitude of up to 3 MV. In the second case, initiation of the positive ascending leader was performed in the electric field created by a cloud of negatively charged aerosol, which simulates the charged thunderstorm cell. In this case, all the phases characteristic of the ascending lightnings initiated by the high ground-based objects and the trigger lightnings during the experiments with an actual thunderstorm cloud were observed in the forming spark discharge with a length of 1.5–2.0 m. The main parameters of the counterpropagating leader, which is initiated in the objects during the large-scale model experiments with a long spark, are shown.