

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 537.527.9; 537.53

**Аналог четочной молнии в воздухе
атмосферного давления при импульсном разряде,
формируемом за счет убегающих электронов**

**В.Ф. Тарасенко, Д.В. Белоплов, Е.Х. Бакшт,
А.Г. Бураченко, М.И. Ломаев***

*Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 8.04.2015 г.

Исследован пробой, инициируемый пучком убегающих электронов, в неоднородном электрическом поле в воздухе атмосферного давления. При подаче на промежуток длиной 18 мм импульсов напряжения амплитудой порядка 200 кВ в ряде импульсов с вероятностью не более 10% в центре промежутка на фоне диффузного разряда наблюдались яркие плазменные образования. По виду свечение наблюдаемых образований напоминает свечение искрового канала. Зарегистрирован временной ход интенсивности излучения плазмы разряда при наличии ярких образований и без них. Установлено, что излучение яркого образования начинает регистрироваться при уменьшении тока разряда и имеет интенсивность на порядок меньшую, чем максимальная интенсивность излучения диффузного разряда. Подобная форма разряда зарегистрирована в импульсно-периодическом наносекундном разряде. На промежуток длиной 6 мм подавались наносекундные импульсы напряжения амплитудой 10–15 кВ. Частота следования импульсов составляла примерно 400 Гц. Появление яркого образования в виде фрагмента искры на фоне диффузного разряда обусловлено генерацией убегающих электронов и перераспределением тока разряда по поперечному сечению плазмы при уменьшении тока через промежуток. Предполагается, что зарегистрированная форма разряда является аналогом четочной молнии, наблюдаемой в атмосфере Земли.

Ключевые слова: пробой воздуха атмосферного давления в неоднородном электрическом поле, экспериментальное моделирование четочной молнии, убегающие электроны; breakdown of atmospheric pressure air in non-uniform electric field, experimental simulation of bead lightning, runaway electrons.

Введение

Импульсные разряды в атмосфере Земли (молнии) отличаются многообразием и оказывают значительное влияние на жизнедеятельность человека [1–4]. Частота появления атмосферных разрядов различного типа существенно зависит от их вида. К наиболее редким относятся четочная и шаровая молнии.

Четочная (жемчужная, цепная, ожерельчатая, капельная) молния, согласно описанию в [1], — это последовательность светящихся устойчивых и относительно небольших сферических образований, которые иногда наблюдаются в атмосфере и часто рассматриваются как след от обычной линейной молнии. Эта молния связана с грозовыми разрядами между облаком и землей или между облаками, что происходит обычно на большом расстоянии от наблюдателя. Число сообщений о наблюдении че-

точной молнии мало и намного меньше, чем сообщений о наблюдении шаровой молнии. Однако в научной литературе [1–9] существует общепринятое мнение, что четочная молния является одной из форм атмосферного электричества. Чаще всего она проявляется как пунктирная светящаяся линия или цепочка пятен, появляющаяся между облаками после обычной линейной молнии. Каждое пятно имеет угловые размеры, соизмеримые с размерами диаметра канала линейной молнии; каждый элемент цепочки, по-видимому, приближается к сферической форме и отделен от соседних пятен темным несветящимся промежутком. Размеры промежутков могут составлять несколько диаметров светящихся пятен.

Завершенная форма четочной молнии представляет собой совокупность большого числа светящихся образований шарообразной формы, которые, как предполагают, существуют одновременно, а не являются кажущимся результатом движения одинокого светящегося образования с периодически меняющейся яркостью. Время существования четочной молнии составляет 1–2 с, и она представляется наблюдателю как устойчивое свечение траектории обычной линейной молнии. В отличие от линейной след четочной молнии не ветвится, что

* Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru); Дмитрий Викторович Белоплов; Евгений Хаимович Бакшт; Александр Геннадьевич Бураченко; Михаил Иванович Ломаев.

является отличительной особенностью этой молнии. Длина светящихся пятен нередко уменьшается от одного конца к другому.

В литературе приводятся различные версии о природе четочной молнии. Так, согласно работе [5], объяснение прерывистого характера свечения четочной молнии, которая появляется в результате первичного пробоя линейной молнии, следующее. После разряда молнии, когда вся плазма рекомбинирует, образовавшийся из воды при первичном пробое ступок водорода горит, диффузионно растекаясь в воздухе. При этом кислород диффузионно поступает из окружающего воздуха, что может приводить к уменьшению размера горячей области. В [5] предполагается, что в процессе диффузного горения расширение и уменьшение (схлопывание) горячей области происходят таким образом, что горящий объект может принимать шаровую форму.

Используя результаты экспериментов с восковыми каплями, помещаемыми между электродами при эрозионном лабораторном разряде, в [6] предложена физическая модель процесса на основе пространственного разделения зарядов. Электроны вследствие большей подвижности прилипают к «тяжелым» макроскопическим восковым образованиям. Положительные ионы уносятся потоком газа. Получается макроскопическое пространственное разделение заряда. Авторы [6] считают, что в обычной плазме описанный процесс просто невозможен при приемлемых энергетических затратах, так как плазма квазинейтральна на расстояниях больше дебаевского радиуса.

В [7] на основе экспериментальных и теоретических исследований плазменных прианодного и катодного шнуров и свойств разряда, горящего между плазменными электродами, образованными электрическими шнурами, установлено, что плазма интенсивно сносится поперечным сверхзвуковым потоком газа. В результате сравнения экспериментальных наблюдений и теоретических исследований делается вывод, что наблюдаемые явления обусловлены кумуляцией (самофокусировкой) электрического поля в активизируемой им среде к центру плазменных структур.

Появление четочной молнии в [8] объясняется возникновением неустойчивостей в цилиндрическом разряде из-за аномальной вязкости. Расчеты, проведенные А.М. Бойченко [9], показывают, что при вложении достаточно большой энергии в плазму по прошествии нескольких миллисекунд после окончания действия источника энергии могут возникать достаточно устойчивые образования, представляющие собой слабоионизованную плазму с временем жизни порядка 1 с. Свечение, производимое этими образованиями, достаточно интенсивное и хорошо воспринимается газом с расстояния в несколько километров.

В настоящей статье сообщается об экспериментальном наблюдении в воздухе атмосферного давления формы разряда, подобной четочной молнии. Данная форма разряда наблюдалась между катодом с малым радиусом кривизны и плоским анодом

в промежутке, на который подавались наносекундные импульсы высокого напряжения отрицательной полярности.

Установки и методики

Эксперименты проводились на двух установках, состоящих из разрядных камер и генераторов импульсов напряжения. На установке № 1 (рис. 1) импульсы напряжения, формируемые генератором РАДАН-220, через короткую передающую линию 1 подавались на электрод 2, который в одном случае был изготовлен из швейной иглы (игольчатый электрод), в другом – из фольги нержавеющей стали толщиной 100 мкм, свернутой в трубку (трубчатый электрод) диаметром 6 мм. Плоский заземленный электрод 3 был также двух видов.

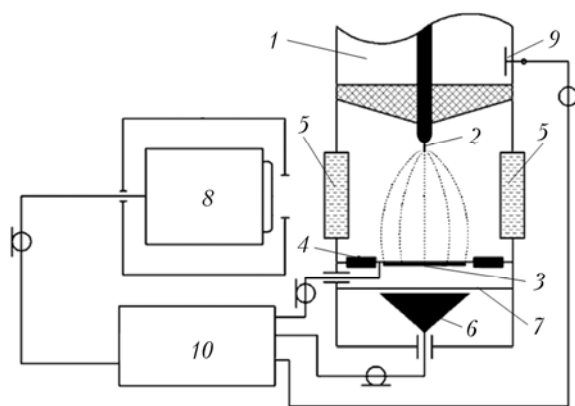


Рис. 1. Схема экспериментальной установки № 1: 1 – передающая линия генератора РАДАН-220; 2 – потенциальный электрод; 3 – заземленный плоский электрод; 4 – чип-резисторы; 5 – боковые окна; 6 – коллектор; 7 – алюминиевая фольга; 8 – фотоприемник PD025 в металлическом экране; 9 – емкостный делитель напряжения; 10 – осциллограф

В случае игольчатого электрода в качестве плоского электрода использовалась алюминиевая пластина диаметром 56 мм со скругленными краями либо сетка, а в случае трубчатого электрода – алюминиевая фольга. Расстояние между электродами составляло 16 или 18 мм. Амплитуда импульса напряжения на промежутке в режиме холостого хода достигала ~200 кВ. Длительность импульса напряжения в передающей линии при согласованной нагрузке составляла порядка 2 нс, а длительность фронта импульса напряжения в передающей линии – порядка 0,5 нс. Однако из-за рассогласования импеданса нагрузки, генератора и волнового сопротивления передающей линии, в результате переотражений прикладываемого импульса напряжения, полная длительность импульса тока разряда составляла несколько десятков наносекунд. Ток через промежуток измерялся с помощью шунта, который был изготовлен из чип-резисторов 4.

Одновременно с импульсом напряжения и тока через промежуток при отрицательной полярности генератора РАДАН-220 в случае сетчатого плоского электрода коллектором 6, расположенным за алю-

миниевой фольгой 7 толщиной 10 мкм, регистрировался сверхкороткий лавинный электронный пучок (СЛЭП) (см. [10–12]). Временной ход излучения плазмы разряда регистрировался фотодиодом PD025 8 (катод LNS20 компании Photech, время нарастания переходной характеристики ~ 80 пс). Сигналы с емкостного делителя напряжения 9, шунта, коллектора и фотодиода подавались на осциллограф DPO70604 10 (6 ГГц, 25 выборок за 1 нс). Эксперименты на установке № 1 проводились в режиме однократных импульсов при двух полярностях генератора.

На установке № 2 использовался импульсно-периодический генератор наносекундных импульсов напряжения отрицательной полярности NPG-18/2000N. Данный генератор позволял осуществить синхронизацию с высокоскоростной четырехканальной CCD-камерой HSFC PRO (12 bit ultra speed intensified imaging), имеющей минимальную длительность экспозиции 3 нс и минимальную временную задержку между каналами 0 нс. Импульсы напряжения амплитудой 10–15 кВ с частотой следования сотни герц через кабель с волновым сопротивлением 75 Ом подавались на катод, изготовленный из нержавеющей стали в виде конуса с диаметром основания 6 мм и углом вершины 30° . Анод был изготовлен из латунной пластины диаметром 38 мм со скругленными краями. Длительность импульса напряжения, подаваемого на катод, на полувысоте составляла 5 нс, длительность фронта по уровню 0,2–0,9 – порядка 3 нс. Так же как и на первой установке, из-за рассогласования импеданса нагрузки, генератора и волнового сопротивления передающего кабеля полная длительность импульса тока разряда превышала длительность импульса напряжения, подаваемого на промежуток.

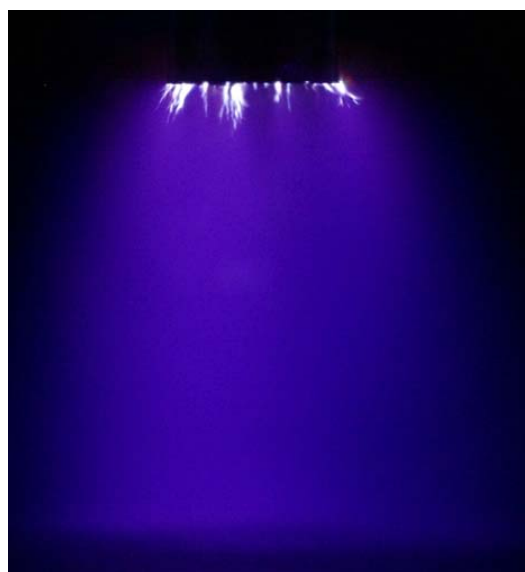
Свечение разряда фотографировалось зеркальным фотоаппаратом Sony A100. Интегральные спектры излучения снимались спектрометром EPP-2000C (Stellar-Net Inc., $\lambda = 192\div 854,5$ нм). Разрядные камеры заполнялись воздухом или азотом атмосферного давления.

Экспериментальные результаты

В большинстве импульсов на обеих установках в воздухе и азоте атмосферного давления формировался объемный разряд, инициируемый пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ). На рис. 2, *a* представлено свечение плазмы ОРИПЭЛ в азоте с трубчатым катодом, а на рис. 3, *a* – в воздухе с игольчатым электродом.

На обоих (трубчатом и игольчатом) электродах при отрицательной полярности импульса напряжения видны яркие пятна, образованные из взрыво-эмиссионных центров. Размер и положение ярких пятен при трубчатом электроде менялись от импульса к импульсу. При игольчатом электроде число ярких пятен уменьшалось, а их размер увеличивался. Анодо-направленные искровые лидеры, развивающиеся из ярких пятен, заканчивались близ катода и только в редком случае достигали длины

порядка трети от межэлектродного расстояния (рис. 2, *б*).



a



б

Рис. 2. Интегральные свечения плазмы разряда в азоте, полученные на установке № 1 при отрицательной полярности. Межэлектродное расстояние 16 мм

На рис. 3 представлено свечение плазмы разряда в воздухе атмосферного давления при межэлектродном расстоянии 18 мм с игольчатым электродом. Плоский электрод был сетчатым. В данных условиях практически в половине импульсов наблюдался ОРИПЭЛ (см. рис. 3, *a*). В промежутке видно свечение диффузного разряда, а на конце иглы – яркое пятно. Вероятность получения разряда данной формы при больших зазорах стремится к 100%.

Диффузный разряд по сравнению с искровым имеет сравнительно малую яркость излучения в видимой области спектра [12–14]. В части импульсов на фоне ОРИПЭЛ наблюдался искровой лидер

(см. рис. 3, б), или искровой канал, перемкнувший промежуток. Формирование искрового канала в подобных условиях описано в [13–15].

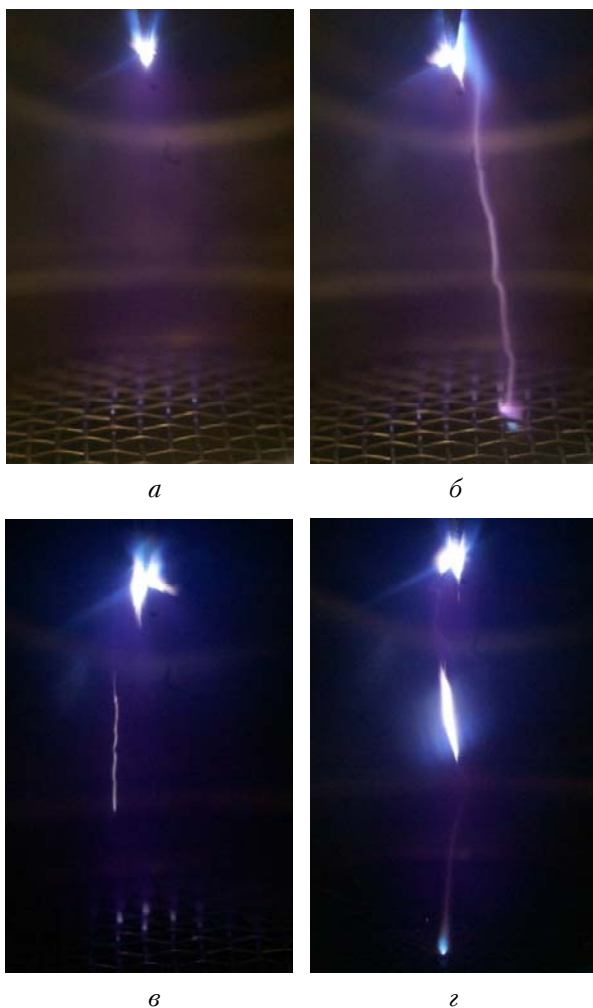


Рис. 3. Интегральные свечения плазмы разряда в воздухе, полученные на установке № 1 при отрицательной полярности. Межэлектродное расстояние 18 мм

Рис. 3, б иллюстрирует прорастание искрового лидера от анода. Катодонаправленный лидер берет начало с яркого пятна на анодной сетке и за время длительности импульса напряжения успевает приблизиться к катоду. Вероятность получения такой формы разряда зависит от амплитуды импульса напряжения, конструкции электродов, межэлектродного зазора, давления и состава газа. В данных условиях она составляла несколько процентов. Подробно условия появления и движения искровых лидеров на установке № 1 описаны в [15].

В редких случаях в центральной части промежутка наблюдались ярко светящиеся образования, напоминающие искру (рис. 3, в, г). Данные образования на установке № 1 регистрировались в малом числе импульсов при отрицательной полярности (с вероятностью не более 10%). При межэлектродном расстоянии 16 мм с обоими катодами ни в одном из нескольких сотен импульсов ярко све-

тящиеся образования в центре промежутка не были зафиксированы. На рис. 3, в, г яркие образования находятся в центре промежутка на удалении от электродов. Если сравнить рис. 3, г с рис. 2.9 монографии [1, с. 30], то можно увидеть определенное сходство. Первое яркое пятно на рис. 3, г видно на остром катоду сверху, затем в промежутке наблюдается область диффузного разряда с существенно меньшей яркостью в видимой области спектра. Далее в центре промежутка снова запечатлено яркое образование с острыми краями, которое со стороны анода переходит в диффузный разряд. Внизу рис. 3, г на аноде видно третье яркое пятно, из которого начинает развиваться катодонаправленный искровой лидер.

При съемке разряда одновременно осуществлялась регистрация импульсов напряжения на промежутке, тока разряда, тока СЛЭП и излучения плазмы разряда. Набор таких осциллограмм для условий на рис. 3, в приведен на рис. 4.

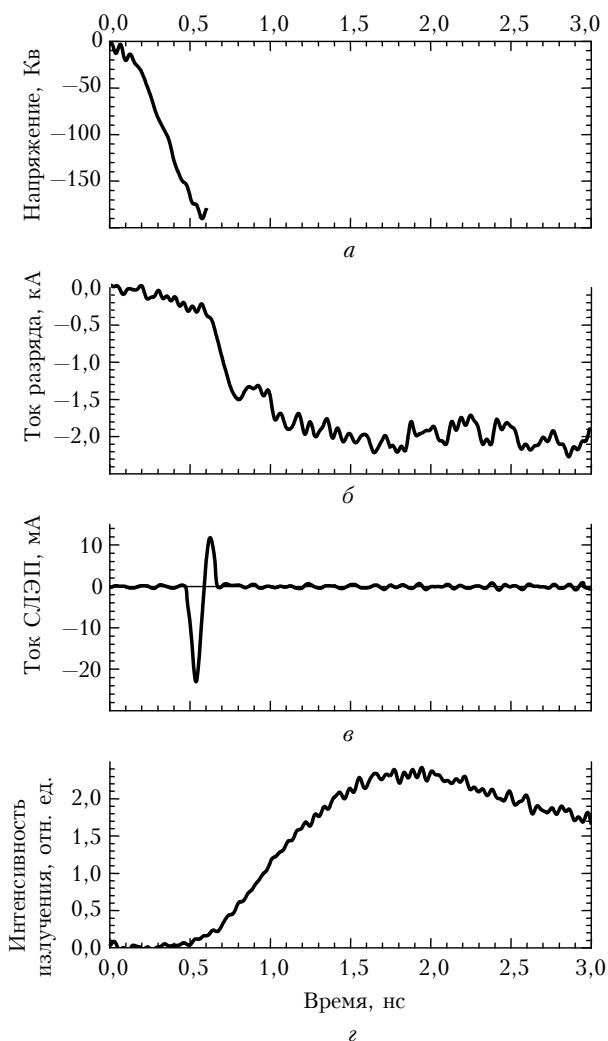


Рис. 4. Осциллограммы импульсов напряжения (а), тока разряда (б), тока СЛЭП (в) и интенсивности излучения плазмы разряда (г), полученные в воздухе атмосферного давления на установке № 1 при межэлектродном расстоянии 18 мм. Импульсы соответствуют разряду на рис. 3, в

Как известно, ОРИПЭЛ формируется благодаря предыонизации газа пучком убегающих электронов на стадии пробоя промежутка. Генерация убегающих электронов начинается на фронте импульса напряжения и фронте импульса тока через промежуток. СЛЭП за анодом регистрируется коллектором примерно во время максимума импульса напряжения. Поскольку осциллограмма импульса напряжения после 600 пс искажалась отраженным импульсом, то на рис. 4 эта часть осциллограммы после начала спада напряжения на промежутке не показана. Излучение второй положительной системы азота из области у электрода с малым радиусом кривизны регистрируется через 200–300 пс после прихода импульса напряжения на промежуток.

Спектральные исследования (см. также [12–14]) показали, что при ОРИПЭЛ в азоте и воздухе наибольшую интенсивность излучения в области спектра 200–600 нм имеет УФ-излучение второй положительной системы азота. Излучение искрового канала состоит из широкополосного континуума, а также линий атомов и ионов азота и кислорода. Кроме того, при контрагировании разряда могут появляться интенсивные линии металлов, из которых сделаны электроды [16, 17]. Интенсивность излучения искрового канала, замкнувшего промежуток, начинает превышать интенсивность излучения второй положительной системы азота при ОРИПЭЛ только при коротких промежутках и увеличении давления азота или воздуха. Для установки № 1 с межэлектродным зазором 12 мм одинаковые амплитуды импульсов излучения второй положительной системы азота и искрового канала, регистрируемые фотодиодом, наблюдались при давлении азота порядка 0,5 МПа. Однако и в этих условиях вначале регистрируется излучение второй положительной системы азота, соответствующее ОРИПЭЛ, а только через несколько наносекунд или позже регистрируется излучение искрового канала.

На рис. 5 приведены нормированные осциллограммы тока разряда и излучения из промежутка в диапазоне 200–600 нм, соответствующие разрядам, представленным на рис. 3, а, б, г. Во всех трех случаях фиксируются одинаковые формы тока разряда. Импульсы излучения несколько отличаются при наличии яркого образования в центре промежутка. Стоит отметить, что основной энергетический вклад в импульс излучения дает вторая положительная система азота. Тем не менее видно, что излучение ярких образований в центре промежутка (см. рис. 3, б и г) начинает давать заметный вклад в излучение плазмы разряда спустя примерно 3 нс от момента подачи импульса напряжения на промежуток именно в тот момент, когда на промежуток приходит импульс напряжения, отраженный вначале. Максимальная интенсивность излучения ярких образований в центре промежутка (разность осциллограмм 1, 2 и 3 на рис. 5, б) достигалась при уменьшении тока через промежуток примерно на девятой наносекунде.

На установке № 2 удалось зарегистрировать динамику развития ярких образований в центре

промежутка с помощью четырехканальной ССД-камеры. Производилась съемка свечения плазмы разряда в разные моменты времени. Длительность экспозиции составляла 3 нс для первых трех кадров (рис. 6, а, б, в), четвертый кадр снимался при длительности экспозиции 100 нс (рис. 6, г).

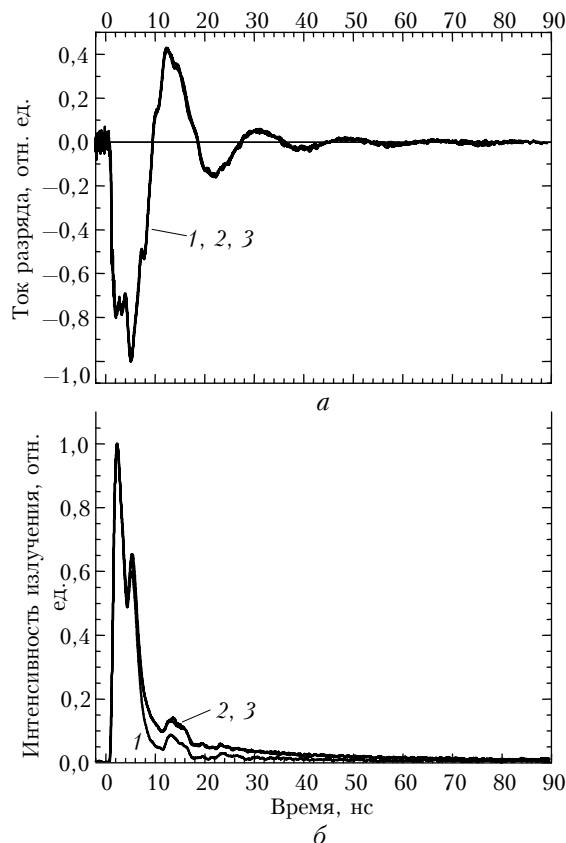


Рис. 5. Нормированные осциллограммы импульсов тока разряда (а) и интенсивности излучения плазмы разряда (б), полученные в воздухе атмосферного давления на установке № 1. Кривые 1 соответствуют разряду на рис. 3, а, а кривые 2, 3 — разряду на рис. 3, б, г соответственно

Временные задержки между моментом подачи импульса напряжения на промежуток и моментом начала съемки составляли 3 нс для первого (см. рис. 6, а) и четвертого (см. рис. 6, г) кадров, 42 и 83 нс для второго (см. рис. 6, б) и третьего (см. рис. 6, в) кадров.

Как видно из рис. 6, в первые несколько наносекунд формируются ОРИПЭЛ и яркое пятно на вершине конусного катода (см. рис. 6, а). Яркость свечения диффузного разряда на данном кадре максимальна, поскольку снимок получен в момент протекания максимума тока разряда, который достигается спустя 4 нс после пробоя. На втором кадре (см. рис. 6, б), полученном спустя 42 нс после пробоя, видно, что диффузная форма разряда сохраняется, но его интенсивность уменьшилась вследствие уменьшения тока разряда (более чем на порядок). При этом вблизи вершины конусного электрода виден анодо направленный искровой лидер. На третьем кадре (см. рис. 6, в), полученном спустя 83 нс,

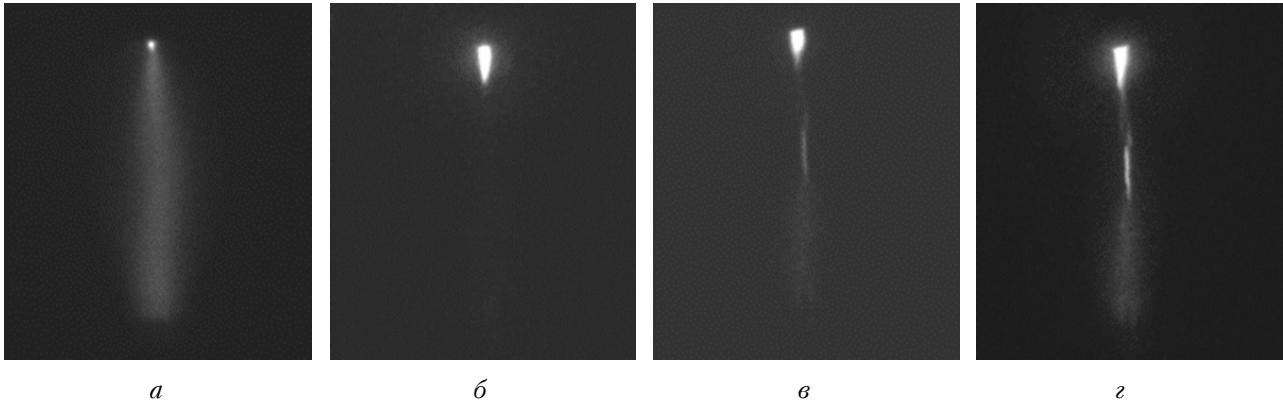


Рис. 6. Свечение плазмы импульсно-периодического разряда, снятое высокоскоростной четырехканальной CCD-камерой HSFC PRO на установке № 2. Межэлектродное расстояние 6 мм. Длительность экспозиции 3 (а, б, в), 100 нс (z). Задержки от начала пробоя 3 (а, z), 42 (б) и 83 нс (в)

на фоне диффузного разряда зарегистрировано яркое плазменное образование в центре промежутка, подобное тому, что наблюдалось на установке № 1 (см. рис. 4, в, z). Данное образование сформировалось не раньше, чем через 45 нс после пробоя, по-видимому, в тот момент, когда на промежуток пришел отраженный импульс напряжения. На рис. 4, z представлено интегральное свечение плазмы разряда (длительность экспозиции 100 нс). Видно, что в целом форма разряда аналогична той, что наблюдалась на установке № 1. Формы разряда в виде фрагмента искры регистрировались и в ряде других импульсов на установке № 2. Вероятность появления ярких плазменных образований в центре промежутка в случае импульсно-периодического разряда была не более 10%.

Обсуждение результатов

В настоящее время достоверно установлено, что разряд линейной молнии сопровождается импульсами рентгеновского излучения, которые возникают вследствие генерации убегающих электронов [18–20]. Амплитуды импульсов напряжения при грозовых разрядах достигают сотен миллионов вольт, токи в молнии могут превышать сотни килоампер, а длина линейной молнии обычно составляет несколько километров [3]. Напряженность электрического поля в атмосфере Земли сравнительно мала, и время излучения из канала молнии может превышать 1 с [3]. Данных о регистрации рентгеновского излучения при четочных молниях нет, по-видимому, из-за отсутствия наблюдений вследствие малой вероятности их образования. Однако известно, что четочная молния обычно появляется после прохождения линейной молнии [1].

При ОРИПЭЛ также происходит генерация убегающих электронов, число которых растет при увеличении амплитуды импульса напряжения, сокращении длительности фронта импульса напряжения и увеличении длины острой кромки катода с малым радиусом кривизны [10, 12]. Длительность свечения плазмы ОРИПЭЛ сравнительно короткая

и обычно составляет десятки наносекунд (см. рис. 5, б). Зафиксировать рентгеновское излучение и пучок убегающих электронов при лабораторных разрядах в неоднородном электрическом поле сравнительно легко даже при использовании импульсов напряжения микросекундной длительности, в том числе при коронном разряде [21, 22].

В ряде импульсов на обеих установках в центральной части промежутка диффузный разряд при уменьшении тока разряда трансформировался в фрагмент искрового канала (яркое плазменное образование в центре промежутка, см. рис. 3, в, z и рис. 6, в, z). Мы предполагаем, что формирование ярких образований в центре промежутка, свечение которых соответствует излучению искрового канала, связано на первом этапе с генерацией убегающих электронов и формированием диффузного разряда. При отрицательной полярности электрода с малым радиусом кривизны у острия, катодного пятна и анодонаправленного искрового лидера, который движется от катода к аноду, генерируются убегающие электроны, осуществляющие предьонизацию прилегающей к катоду области промежутка. Это приводит к формированию в данной области диффузного разряда с малой интенсивностью излучения в видимой области спектра. Фронт диффузной плазмы, имеющий поперечный размер на установке № 1 около 1 см, из-за его поляризации также является источником убегающих электронов, которые предьонизируют оставшуюся часть промежутка и в нем формируется ОРИПЭЛ [12] (см. рис. 3, а и рис. 4, а).

На втором этапе за областью диффузного разряда у катода при существенном уменьшении тока разряда происходят перераспределение плотности тока по сечению разряда и увеличение плотности тока в наиболее нагретых областях. Соответственно формируется фрагмент искрового канала. Вторичный переход от яркого образования (фрагмента искрового канала), которое имеет существенно меньшие размеры, чем фронт диффузного разряда, можно также связать с повторной генерацией убегающих электронов с конца яркого образования из-

за увеличения электрического поля в этой области. Таким образом, при лабораторных разрядах в неоднородном электрическом поле можно наблюдать аналоги четочной молнии.

Заключение

Проведенные исследования показали, что при формировании ОРИПЭЛ в ряде импульсов в центре разрядного промежутка регистрируются яркие образования (фрагменты искрового канала). Считаем, что данные образования являются аналогами плазменных сгустков в четочной молнии и имеют одну физическую природу формирования первичных неоднородностей в канале линейной молнии. Переход от катода-острия, катодного пятна и анодонаправленного лидера к диффузному разряду происходит за счет генерации убегающих электронов в области с усиленным электрическим полем.

Далее источником убегающих электронов является фронт волны ионизации диффузного разряда, который движется к аноду. Возникновение ярких плазменных образований в центре промежутка за областью диффузного разряда происходит при существенном уменьшении тока разряда и обусловлено перераспределением плотности тока по сечению разряда и увеличением плотности тока в наиболее нагретых областях.

Вторичный переход от яркого образования (фрагмента искрового канала), которое имеет существенно меньшие размеры, чем фронт диффузного разряда, можно также связать с повторной генерацией убегающих электронов с конца яркого образования и переходом его в диффузный разряд. Соответственно, формирование четочной молнии более вероятно при пробое с отрицательно заряженного облака. Как известно, при таком пробое наблюдается ступенчатое движение лидера к Земле [3], что можно объяснить последовательными переходами от контрагированного к диффузному разряду. После перехода к диффузному разряду скорость генерации убегающих электронов и скорость движения лидера молнии замедляются, так как уменьшается электрическое поле на его фронте, а после образования канала снова увеличивается. Данная неоднородность в канале молнии усиливается на последующей фазе при уменьшении тока разряда, что следует из расчетов в [9], соответственно четочная структура молнии будет проявляться на более поздней стадии развития линейной молнии. Это подтверждают наблюдения, описанные в [1]. Отметим, что задержка в появлении ярких образований, зависящая от амплитуды импульса напряжения, была зарегистрирована и в настоящей работе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00052).

1. Барри Дж. Шаровая молния и четочная молния. М.: Мир, 1983. 288 с.
2. Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии. М.: Научный мир, 1996. 264 с.
3. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 320 с.

4. Rakov V.A., Uman M.A. Lightning: Physics and Effects. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003. V. 1. 698 p.
5. Аланакян Ю.Р. Природа четочной молнии. О структуре канала линейной молнии // Докл. РАН. 2009. Т. 425, № 3. С. 328–330.
6. Битюрин В.А., Великодный В.Ю., Самулис И.А. Исследование свойств эрозийного разряда в газодисперсном потоке // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, вып. 21. С. 61–68.
7. Высикайло Ф.И., Ершов А.П., Кузьмин М.И., Тивков А.С., Чекалин Б.В. Особенности переноса тока в разряде в поперечном сверхзвуковом потоке газа при формировании цилиндрических, кумулятивных структур (плазмондов) // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2007. № 5. С. 1–31.
8. Ludwig G.O., Saba M.M.F. Bead lightning formation // Phys. Plasm. 2005. V. 12. 093509 (15 p.).
9. Бойченко А.М. К вопросу о природе четочных молний // Физ. плазмы. 1996. Т. 22, № 11. С. 1012–1016.
10. Tarasenko V.F., Baksht E.Kh., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V. Generation of supershort avalanche electron beams and formation of diffuse discharges in different gases at high pressure // Plasma Devices Oper. 2008. V. 16, N 4. P. 267–298.
11. Tarasenko V.F., Kostyrya I.D., Rybka D.V. Пробой в воздухе атмосферного давления при наносекундной длительности импульса напряжения за счет убегающих электронов // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 103–108.
12. Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges / Ed. by V.F. Tarasenko. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2014. 598 p.
13. Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф., Кривоногова К.Ю. Излучательные характеристики азота при возбуждении объемным разрядом, инициируемым пучком убегающих электронов // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 107, № 1. С. 40–47.
14. Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Lomaev M.I., Sorokin D.A., Jan P., Kozыrev A.V., Baksht E.Kh. Spark discharge formation in an inhomogeneous electric field under conditions of runaway electron generation // Appl. Phys. 2012. V. 111. 023304 (10 p).
15. Тарасенко В.Ф., Бакут Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А. Переход от диффузного к искровому разряду при наносекундном пробое азота и воздуха повышенного давления в неоднородном электрическом поле // Ж. техн. физ. 2013. Т. 83, вып. 8. С. 29–35.
16. Бакут Е.Х., Тарасенко В.Ф., Шутько Ю.В., Ерофеев М.В. Точечный источник УФ-излучения с малой длительностью импульса // Квант. электрон. 2012. Т. 42, № 2. С. 153–156.
17. Тарасенко В.Ф., Белоплотов Д.В., Ломаев М.И. О природе излучения голубых и зеленых струй в лабораторных разрядах, инициируемых пучком убегающих электронов // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 4. С. 349–353.
18. Гуревич А.В., Зыбин К.П. Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы // Успехи физ. наук. 2001. Т. 171, № 11. С. 1177–1199.
19. Dwyer J.R., Rassoul H.K., Al-Dayeh M., Caraway L., Chrest A., Wright B., Kozak E., Jerauld J., Uman M.A., Rakov V.A., Jordan D.M., Rambo K.J. X-ray bursts associated with leader steps in cloud-to-ground lightning // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L01803 (4 p).
20. Hazelton B.J., Grefenstette B.W., Smith D.M., Dwyer J.R., Shao X.M., Cummer S.A., Chronis T., Lay E.H.,

- Holzworth R.H.* Spectral dependence of terrestrial g-ray flashes on source distance // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L01108 (5 p).
21. *Рыбка Д.В., Андроников И.В., Ештушенко Г.С., Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Тригуб М.В., Шутько Ю.В.* Коронный разряд в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе напряжения длительностью 10 мс // *Оптика атмосфер. и океана.* 2013. Т. 26, № 1. С. 85–90.
22. *Тарасенко В.Ф., Костыря И.Д.* Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения при пробое воздуха атмосферного давления импульсами напряжения с фронтом ~0,5 мкс // *Физ. плазмы.* 2015. Т. 41, № 3. С. 294–299.

V.F. Tarasenko, D.V. Beloplotov, E.Kh. Baksht, A.G. Burachenko, M.I. Lomaev. **Equivalent of bead lightning in pulse discharge generated by runaway electrons in atmospheric pressure air.**

The breakdown initiated by runaway electrons in non-uniform electric field in atmospheric pressure air was investigated. Bright plasma channels (like filaments) in the center of the discharge gap was observed on the background of the diffuse discharge at applying high-voltage pulses with an amplitude of about 200 kV across the discharge gap with interelectrode distance of 18 mm. Occurrence probability of the ones was no more than 10%. Glow of the bright plasma channels are similar to the one of a spark. It was found that the bright plasma channels appear on the decline stage of the discharge current. Radiation intensity of the one is an order of magnitude less than that of the diffuse discharge. Furthermore, the bright plasma channels was observed in pulse-periodic discharge. In this case, nanosecond voltage pulses with an amplitude of 10–15 kV was applied across the discharge gap with interelectrode distance of 6 mm. Pulse repetition rate was 400 Hz. Occurrence of the bright plasma channels on the background of diffuse discharge is due to generation of runaway electrons and the discharge current redistribution in cross-section of the discharge plasma on the decline stage of the discharge current. It is assumed that the registered form of the discharge is analog of bead lightning observed in the Earth's atmosphere.