

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ  
ПЛАЗМА

УДК 537.527.9537.53

РАЗРЯДЫ С “ЧЕТОЧНОЙ” СТРУКТУРОЙ,  
ФОРМИРУЕМОЙ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ПРОБОЕ  
ВОЗДУХА И АЗОТА

© 2019 г. Д. В. Белоплотов<sup>а</sup>, А. М. Бойченко<sup>а</sup>, В. Ф. Тарасенко<sup>а, \*</sup>

<sup>а</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

\*e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 14.07.2018 г.

После доработки 14.10.2018 г.

Принята к публикации 25.10.2018 г.

Исследован режим импульсного разряда в неоднородном электрическом поле, при котором в воздухе атмосферного давления формируются яркие плазменные образования, образующие “четочную” структуру. С помощью ICCD-камеры показано, что за короткие промежутки времени (единицы—десятки наносекунд), “четочную” структуру при сантиметровой промежутке и длительности импульса напряжения  $\approx 300$  нс можно наблюдать с вероятностью близкой к 100%. Показано, что на интегральных фотографиях излучения из промежутка четочная структура разряда также может регистрироваться, но с малой вероятностью. Подтверждено, что отдельные четки возникают в промежутке острие—плоскость после диффузной стадии разряда и стартуют от электрода с малым радиусом кривизны. Установлено, что искровой канал замыкает промежуток, проходя через образовавшиеся четки, и, что при уменьшении тока разряда в его заключительной стадии, соответственно, и интенсивности излучения искрового канала, снова регистрируется свечение четок.

DOI: 10.1134/S0367292135030019

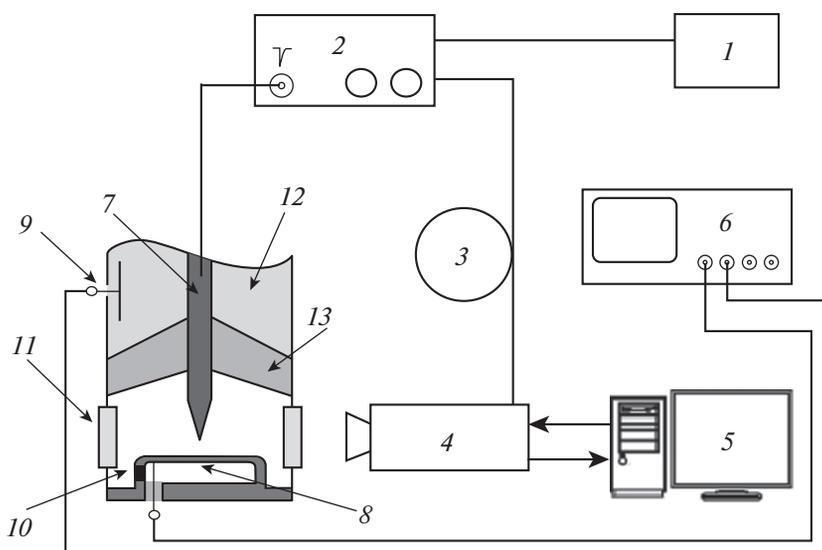
## 1. ВВЕДЕНИЕ

Последние годы возрос интерес к изучению атмосферных разрядов различных форм (см., например, [1–5]). Это связано в первую очередь с улучшением регистрирующей аппаратуры и использованием для наблюдений самолетов и межпланетной космической станции, а также совершенствованием программ для моделирования процессов. Одним из наименее изученных видов атмосферных разрядов остается четочная молния (см. ее описание в монографиях и статьях [6–10]). Подробно исследовать четочную молнию из-за ее редкого и непрогнозируемого появления в природных условиях с помощью высокоскоростных камер пока не удалось. В литературе последних лет имеется только несколько публикаций, посвященных наблюдениям четочной молнии в природных условиях [11, 12].

Наиболее интересные результаты, иллюстрируемые фотографиями, приведены в работе [11], где описана четочная молния, наблюдаемая в искусственно инициируемом атмосферном разряде. В [11] было проведено фотографирование инициируемой молнии при длительности экспозиции отдельных кадров 1 мс. С помощью последовательности из 14 снимков установлено, что вначале (кадры 3, 4 и 5 на рис. 1 в [11]) наблюдает-

ся свечение сравнительно яркого канала, которое однородно по его длине. На 6 кадре и далее на кадрах 7 и 8 заметно, что на канале возникают отдельные четки, которые соединены между собой. На последующих кадрах (9–13) интенсивность излучения молнии уменьшается и между отдельными четками хорошо видны темные области. Длина отдельной четки в этих условиях составила около 50 см. Далее (кадр 14), при возвратном ударе (развитии обратного лидера), снова видно сравнительно однородное свечение канала большей интенсивности по всей его длине. Анализируя эти данные нами было сделано предположение, что четочную структуру молнии, а также лабораторных разрядов, легче наблюдать при фотографировании свечения разряда, используя короткие длительности отдельных кадров. Для проверки данного предположения нами были проведены исследования лабораторных разрядов в неоднородном электрическом поле. Уменьшение размеров исследуемых объектов до сантиметрового уровня было осуществлено за счет применения малых напряжений (десятки—сотни киловольт) по сравнению с напряжениями при природных молниях.

Отметим, что ранее, при исследованиях лабораторных разрядов, излучение аналогов четоч-



**Рис. 1.** Блок-схема экспериментальных установок № 2 и № 3: 1 – генератор запуска, 2 – генератор импульсов высокого напряжения, 3 – линия задержки, 4 – четырехканальная ICCD камера, 5 – компьютер, 6 – осциллограф, 7 – высоковольтный электрод, 8 – плоский заземленный электрод, 9 – емкостный делитель напряжения, 10 – чип-резисторы шунта, 11 – окно из кварца, 12 – трансформаторное масло, 13 – изолятор.

ной молнии также было зарегистрировано [13–15]. В работе [13] при подаче на промежуток длиной 18 мм импульсов напряжения амплитудой ~200 кВ в ряде импульсов с вероятностью не более 1% на интегральных снимках, полученных с помощью цифрового фотоаппарата, в центре промежутка наблюдались яркие плазменные образования (четки) на фоне диффузного разряда. По виду, свечение наблюдаемых образований напоминало часть искрового канала. Был зарегистрирован временной ход интенсивности излучения плазмы разряда при наличии четок и без них. Установлено, что излучение яркого образования начинает регистрироваться при уменьшении тока разряда, и что в промежутке искровой канал не успевает сформироваться. Подобная форма разряда также была реализована при импульсно-периодическом разряде. С помощью четырехканальной ICCD-камеры было установлено, что вначале в промежутке формируется диффузный разряд, а затем в его центральной части появлялась четка. В этих экспериментах на промежуток длиной 6 мм подавались наносекундные импульсы напряжения амплитудой 10–15 кВ. Частота следования импульсов составляла  $\approx 400$  Гц.

В работе [14] аналог четочной молнии наблюдался при формировании искры длиной в несколько метров. Из анализа полученных фотографий следовало, что отдельные четки появляются при уменьшении тока разряда. Число четок, как можно было понять из приведенных в [14] фотографий, не превышало 20. Появление четок объяснялось различной скоростью охлаждения канала искры, в котором при его формировании воз-

никали неоднородности. На канале разряда были зарегистрированы последовательно расположенные участки, в которых изменялась его форма. На отдельных участках регистрировалось свечение одиночного канала, а между этими участками разряд состоял из нескольких тонких каналов. При этом интенсивность излучения тонких каналов уменьшалась быстрее, чем интенсивность одиночного канала, что приводило к формированию четочной структуры. Такое поведение объяснялось более быстрым охлаждением участков разряда с тонкими параллельными каналами. В [14] предполагалось, что в природных условиях наблюдается подобные неоднородности в канале молнии, а неоднородное охлаждение различных областей приводит к появлению отдельных четок на заключительной стадии разряда.

В работе [15] были продолжены исследования, начатые в [13] и удалось наблюдать формирование нескольких плазменных образований, образующих четочную структуру. Была исследована динамика свечения разряда в промежутке острие–плоскость при наносекундном пробое воздуха и азота. С помощью ICCD-камеры было показано, что число ярких образований в промежутке (отдельных четок) увеличивается при повышении давления азота. Так при давлении азота 0.4 МПа регистрировалось до 4 отдельных четок одинакового размера. Однако в воздухе атмосферного давления четочная структура разряда с помощью ICCD-камеры при наносекундной длительности фронта импульса напряжения амплитудой десятки киловольт зарегистрирована не была. В работах [13, 15] отдельные четки наблюда-

лись без расслоения основного канала на параллельные каналы меньшего диаметра, как было в работе [14], и перед формированием отдельных четок в промежутке регистрировался диффузный разряд. Важным является то, что в режимах разряда, описанных в [13, 15], на фронте импульса тока разряда за анодом из тонкой алюминиевой фольги коллектором регистрировался пучок убегающих электронов.

Различные режимы генерации пучков убегающих электронов подробно описаны в коллективной монографии [16]. Роль убегающих электронов при формировании стримеров в лабораторных разрядах начала исследоваться сравнительно недавно [17]. Однако во многих работах, которые публиковались ранее и продолжают публиковаться в последние годы, роль убегающих электронов при формировании различных форм разрядов не учитывалась. В данной работе, хотя и сообщалось о регистрации убегающих электронов, задача подробно исследовать влияние внешних условий на генерацию убегающих электронов не ставилась. Рентгеновское излучение при искровом разряде в метровых промежутках исследовалось во многих работах, см., например, гл. 8 в [16] и работу [18], но четочная структура разряда при этом не наблюдалась.

Отметим, что описанные выше четочные структуры природных и лабораторных разрядов принципиально отличаются от поперечных страт, которые легко зарегистрировать в тлеющем разряде [19]. Плазма отдельных четок близка по своим свойствам к плазме искрового разряда атмосферного давления, а страты наблюдаются при низких давлениях в плазме положительного столба тлеющего разряда.

Цель данной работы — установить условия стабильного наблюдения плазменных образований (четок) в воздухе и азоте атмосферного давления при сантиметровой длине разрядного промежутка, а также объяснить динамику их формирования при разрядах в промежутках острие—плоскость и причины обычного отсутствия четочной структуры на интегральных фотографиях искровых разрядов.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ

Экспериментальные исследования проводились на трех установках при напряжениях генераторов в десятки и сотни кВ. В первой установке, как и в работах [13, 15], использовался генератор высоковольтных наносекундных импульсов напряжения РАДАН-220. Импульсы напряжения отрицательной и положительной полярности подавались на промежуток острие—плоскость, или трубка—плоскость, или лезвие—лезвие. Высоко-

вольтный электрод имел малый радиус кривизны и был изготовлен из швейной иглы диаметром 1 мм с радиусом скругления вершины 0.1 мм, или из фольги толщиной 100 мкм из нержавеющей стали, которая была свернута в трубку диаметром 6 мм. Заземленный электрод в этих экспериментах был плоским. Кроме того, использовались два электрода из бритвенных лезвий длиной 19 (высоковольтный электрод) и 38 мм (заземленный). В режиме холостого хода амплитуда импульса напряжения достигала  $\approx 250$  кВ. Длительность импульса напряжения в передающей линии генератора при длительности фронта  $\approx 0.5$  нс составляла  $\approx 2$  нс на полувысоте. Межелектродное расстояние могло изменяться от 10 до 18 мм. При отрицательной полярности электрода с малым радиусом кривизны за анодом из алюминиевой фольги толщиной 10 мкм или сетки регистрировался пучок убегающих электронов (сверхкороткий лавинный электронный пучок — СЛЭП) [16]. Для регистрации СЛЭП применялся коллектор с диаметром приемной части 20 мм. При атмосферном давлении воздуха и азота за анодной фольгой длительность импульса тока СЛЭП на полувысоте составила  $\approx 100$  пс, а его амплитуда при оптимизации конструкции катода достигала нескольких десятков ампер.

На второй установке использовался генератор наносекундных импульсов напряжения ГИН-100-1 отрицательной полярности, разработанные компанией “Антарес”. Данный генератор можно было синхронизировать с ICCD-камерой с субнаносекундной точностью. Импульсы напряжения подавались на промежуток острие—плоскость, размещенный в откачиваемой камере. Острийный электрод был изготовлен в форме конуса с углом раствора  $60^\circ$ . Кроме того, использовался сферический электрод из нержавеющей стали. Межелектродное расстояние обычно составляло 3 мм. Генератор формировал импульсы напряжения отрицательной полярности с амплитудой 25 кВ на согласованной нагрузке. Длительность импульса напряжения на полувысоте составляла  $\approx 4.2$  нс, а длительность фронта —  $\approx 2$  нс. Генератор подключали к газоразрядному промежутку с помощью коаксиального кабеля длиной 3 м с волновым сопротивлением 75 Ом. При максимальных напряжениях на промежутке и давлении 100 кПа, как и на первой установке, за анодом из алюминиевой фольги толщиной 10 мкм коллектором регистрировался СЛЭП.

На третьей установке использовался самодельный генератор, который формировал импульсы напряжения синусоидальной формы с амплитудой до 35 кВ. Длительность импульсов на полувысоте в режиме холостого хода составляла  $\approx 300$  нс. Генератор подключали к газоразрядному промежутку с помощью коаксиального кабеля длиной 60 см с волновым сопротивлением 75 Ом.

Высоковольтный электрод (катод) был изготовлен из швейной иглы длиной 5 мм, диаметром основания 1 мм и радиусом закругления кончика иглы 75 мкм. Заземленный электрод был плоским. Расстояние между электродами равнялось 8.5 мм. Данный генератор можно было синхронизировать с ICCD-камерой с наносекундной точностью. Эксперименты на всех трех установках проводились в моноимпульсном режиме. Блок-схема экспериментальных установок № 2 и № 3 с ICCD-камерой и регистрацией тока разряда шунтом из чип-резисторов показана на рис. 1.

Газоразрядные камеры на всех трех установках заполнялись атмосферным воздухом или азотом. Давление воздуха варьировалось в диапазоне 50–100 кПа, а азота – в диапазоне 50–400 кПа.

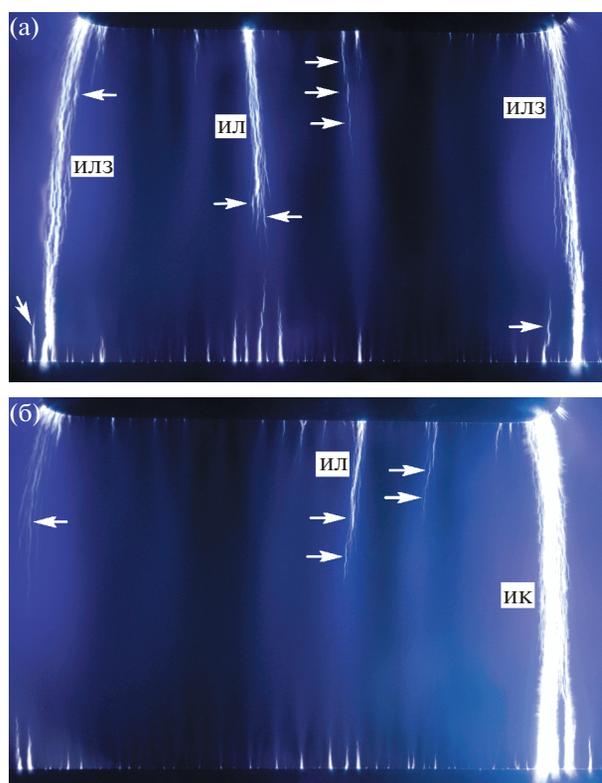
Регистрация импульсов напряжения осуществлялась с помощью емкостных делителей напряжения. Ток разряда регистрировался с помощью шунта, изготовленного из чип-резисторов. Импульсы напряжения, тока разряда и тока СЛЭП подавались на осциллограф DSO-X 6004A (KeysightTech) (6 ГГц, частота дискретизации 20 ГС/с) или TDS-3034 (0.3 ГГц, частота дискретизации 5 ГС/с).

Свечение плазмы разряда фотографировалось зеркальным фотоаппаратом SonyA100. Кроме того, на установках № 2 и № 3 свечение плазмы разряда фотографировалось с помощью четырехканальной ICCD-камеры HSFC PRO. При этом минимальная длительность одного кадра составляла 3 нс. Путем подбора длины линии задержки синхросигнала от генератора (рис. 1) удавалось осуществлять запуск ICCD-камеры 2–3 нс раньше момента пробоя. Это позволило регистрировать свечение плазмы в предпробойной стадии разряда с точностью в единицы нс.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

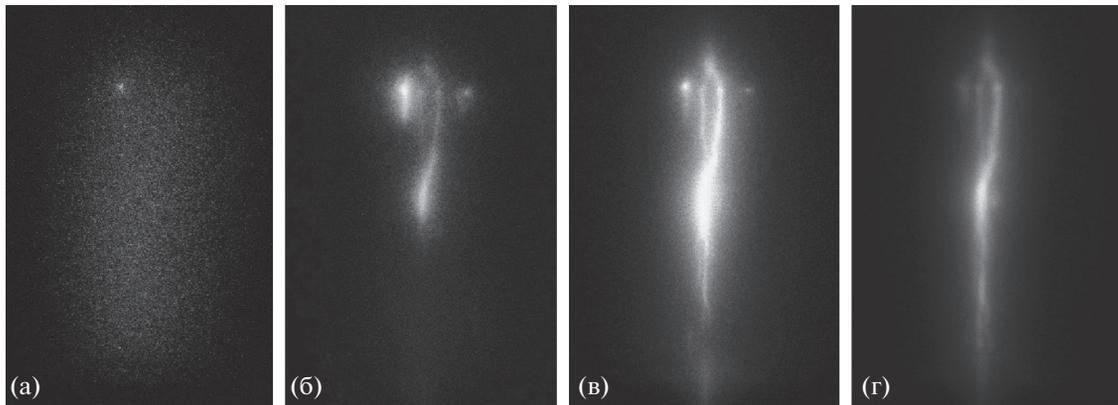
На установках № 1 и № 2 при наносекундных длительностях импульса напряжения и относительно больших межэлектродных зазорах, величина которых зависела от амплитуды импульса напряжения, в промежутке обычно формировался диффузный разряд или диффузный разряд с искровым лидером. При этом разряд в азоте является более однородным, чем в воздухе. Подробно данные режимы разряда описаны в работах [20–22].

При использовании электродов лезвие–лезвие на установке № 1, в части из импульсов можно было наблюдать на интегральных фотографиях свечения промежутка плазменные образования различной формы. На рис. 2 видны искровые лидеры (ИЛ), которые за время действия импульса напряжения пересекли только часть промежутка; искровые лидеры (ИЛЗ), которые замкнули



**Рис. 2.** (в цвете онлайн) Интегральные фотографии излучения разряда в воздухе при давлении 100 кПа, полярность импульса напряжения положительная, установка № 1, электроды бритвенные лезвия,  $d = 13$  мм: промежуток замкнут двумя искровыми лидерами ИЛЗ и в нем также виден искровой лидер ИЛ, остановившийся в центре (а); промежуток замкнут искровым каналом ИК (б). Стрелками показаны отдельные плазменные неоднородности, возникающие в промежутке при его пробое.

промежуток; искровой канал (ИК), который успел сформироваться в промежутке после замыкания его искровым лидером. На фотографиях, рис. 2, также можно увидеть вытянутые плазменные образования (на них указывают стрелки), в том числе расположенные в виде цепочки. Эти образования в ряде случаев не имеют контакта с искровыми лидерами и между собой. Следует отметить, что подобные яркие образования, находящиеся на удалении от электродов и от искровых лидеров, контактирующих с электродами, наблюдались во многих работах (см., например, [22–24]). Зарегистрировать аналог четочной молнии с электродами лезвие–лезвие за сотни импульсов нам не удалось. Тогда как, с высоковольтным катодом отрицательной полярности в виде острия при межэлектродном зазоре 18 мм на интегральных фотографиях с вероятностью  $\sim 1\%$  регистрировались одиночные четки. Фотографии подобных четок приведены в работах [13, 15]. Ис-



**Рис. 3.** Фотографии излучения разряда в воздухе при давлении 100 кПа, полученные на установке № 2 при включении четырех каналов ICCD-камеры с задержками от времени подачи импульса напряжения на промежутки  $\approx 0$  (а), 7 (б), 13 (в) и 22 нс (г). Амплитуда импульса напряжения отрицательной полярности в падающей волне 25 кВ, фронт импульса 2 нс. Высоковольтный электрод в виде сферы расположен сверху, а плоский снизу.  $d = 3$  мм, высота фотографий 4.5 мм.

пользовать ICCD-камеру на установке № 1 мы не могли из-за проблем с синхронизацией.

На установке № 2, за счет увеличения числа импульсов в данной серии экспериментов, были зарегистрированы отдельные четки при атмосферном давлении воздуха. Ранее, в работе [15], на этой установке четки были зарегистрированы только при давлении азота 400 кПа. Формирование четок на установке № 2 было исследовано с помощью ICCD-камеры. На рис. 3 приведены фотографии свечения разрядного промежутка в различные моменты времени, полученные в воздухе атмосферного давления при длительности одного кадра 3 нс.

Вначале за счет генерации СЛЭП в промежутке формируется диффузный разряд, рис. 3а. Плазменное образование при данной форме импульса напряжения и величине зазора возникало в центре разрядного промежутка через несколько наносекунд (рис. 3б), затем через него проходил канал, соединяющий два электрода (рис. 3в и г).

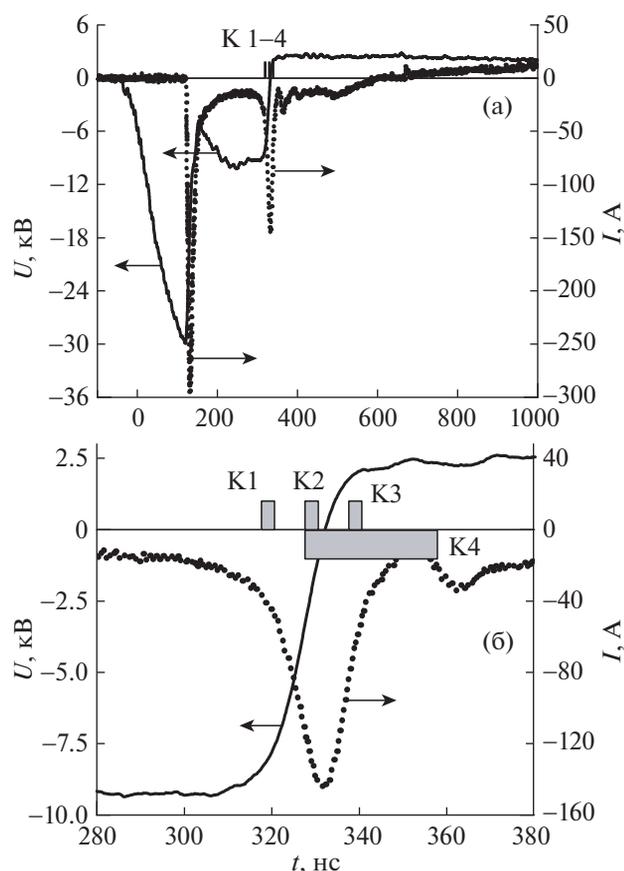
Как было установлено ранее, см., например, [25, 26], а также подтверждено в данной работе, пробой промежутка в неоднородном электрическом поле происходит за счет волны ионизации (стримера или стримеров), которая стартует с электрода с малым радиусом кривизны. Формирование диффузного разряда обусловлено генерацией убегающих электронов [22], пучок которых (СЛЭП) при отрицательной полярности импульса напряжения легко зарегистрировать за анодной фольгой [16, 22, 25–27].

На основе полученных на установках № 1 и № 2, а также анализа опубликованных данных, было предположено, что для регистрации четок необходимо использовать импульсы напряжения большой длительности и увеличивать длину меж-

электродного зазора, а амплитуда тока разряда должна быть ограничена. Для этих целей была специально разработана установка № 3 с генератором, формирующим импульсы напряжения синусоидальной формы. Длительность импульса напряжения на полувысоте при холостом ходе составляла  $\approx 300$  нс, а межэлектродный зазор по сравнению с установкой № 2 был увеличен до 8.5 мм. Фронт импульса напряжения равнялся  $\approx 200$  нс. При такой длительности фронта импульса напряжения с амплитудой 35 кВ пробой промежутка в воздухе атмосферного давления происходил при напряжении 20–30 кВ. На установке № 3 при атмосферном давлении воздуха и межэлектродном зазоре 8.5 мм впервые удалось зарегистрировать с помощью ICCD-камеры четки в каждом импульсе.

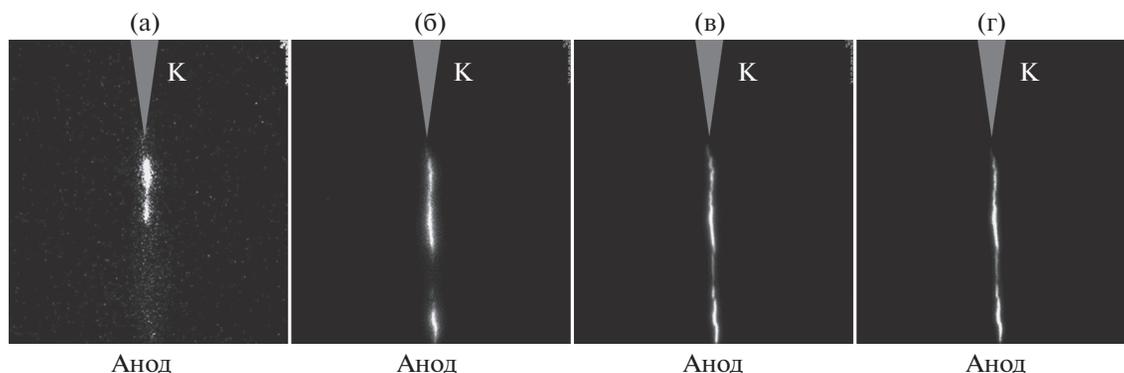
Импульсы напряжения на промежутке и тока через промежуток, а также длительности и положение кадров ICCD-камеры, показаны на рис. 4, а фотографии на рис. 5. Осциллограмма тока разряда имеет два пика тока. Первый пик соответствует пробую промежутка волной ионизации (стримером) [25, 26] и формированию диффузного разряда. При втором в промежутке формируются четки и искровой канал. Свечение промежутка в моменты времени, указанные на осциллограммах, рис. 4, показано на рис. 5. Так как для условий на рис. 4 и 5 ICCD-камера включалась на втором пике тока разряда, то свечение диффузного разряда на данных кадрах не заметно. Формирование первой четки начинается при диффузном разряде от электрода с малым радиусом кривизны. С импульсом напряжения на рис. 4 было зарегистрировано три четки (рис. 5).

Проведение серий экспериментов, показало, что число четок в промежутке, регистрируемых с помощью ICCD-камеры, изменялось от импуль-



**Рис. 4.** Осциллограммы импульсов напряжения и тока разряда, представленные в двух временных масштабах. На осциллограммах указано положение кадров (K1, K2, K3 и K4) с ICCD-камеры и их длительность.

са и могло достигать восьми. Импульсы напряжения и тока разряда для большего числа четок, а также фотографии свечения промежутка приведены на рис. 6 и рис. 7 соответственно.



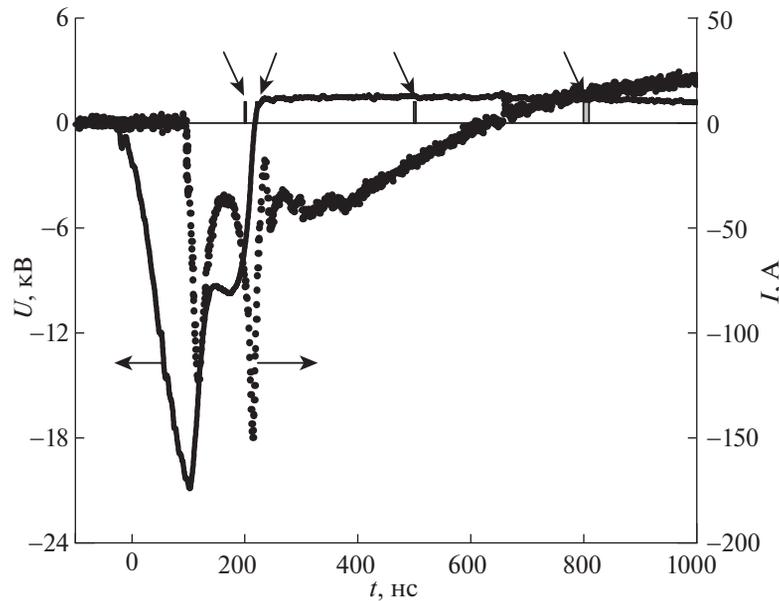
**Рис. 5.** Фотографии излучения разряда в воздухе при давлении 100 кПа, полученные на установке № 3 при включении четырех каналов ICCD-камеры в моменты времени, показанные на рис. 4б. Высоковольтный катод в виде иглы (К) расположен сверху, а плоский внизу (Анод),  $d = 8.5$  мм: кадр K1 (а), K2 (б), K3 (в) и K4 (г).

Видно, что при экспозиции одного кадра 10 нс и его задержке относительно подачи импульса напряжения  $\sim 800$  нс четочная структура разряда сохраняется, а число четок равно семи. На интегральных фотографиях четочную структуру с явно выделенными отдельными плазменными образованиями зафиксировать фотоаппаратом было сложно, что можно связать с изменением положения четок в промежутке и большой интенсивностью излучения искрового канала, который замыкал промежуток. Однако на части фотографий излучения из промежутка, полученных на установке № 3 с помощью фотоаппарата Sony A100, четочная структура разряда также регистрировалась.

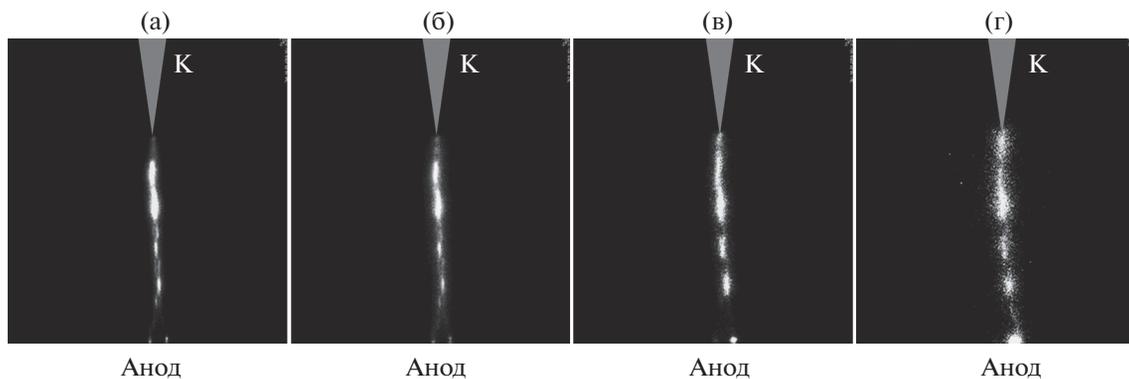
#### 4. УСЛОВИЯ ПЕРВОГО ПОЯВЛЕНИЯ В ПРОМЕЖУТКЕ ЧЕТОК

Из полученных данных и известных работ (см., например, коллективные монографии [16, 22]), следует, что при атмосферном давлении воздуха и азота в промежутке с неоднородным электрическим полем за счет генерации убегающих электронов формируется диффузный разряд. Как было установлено в работах [13, 15] и подтверждено в данной работе, плазменные неоднородности (четки) в промежутке появляются при уменьшении тока через промежуток и приводят к контрагированию разряда. Вероятность появления четок и их количество, а также динамика их формирования, изменяются от импульса к импульсу в зависимости от экспериментальных условий. На основании полученных в данной работе результатов предлагается следующая последовательность процессов, которая приводит к формированию серии четок.

На первой стадии разряда, за счет замыкания промежутка стримером, формируется диффузный разряд (см. также [26]). В лабораторных разрядах при неоднородном электрическом поле и



**Рис. 6.** Осциллограммы импульсов напряжения и тока разряда. На осциллограммах указано положение кадров с ICCD-камеры и их длительность.



**Рис. 7.** Фотографии излучения разряда в воздухе при давлении 100 кПа, полученные на установке № 3 при включении четырех каналов ICCD-камеры в моменты времени, показанные на рис. 4. Время экспозиции первых трех кадров 3 нс (а–в), а четвертого 10 нс (г). Высоковольтный катод в виде иглы (К) расположен сверху, а плоский (Анод) внизу,  $d = 8.5$  мм.

отрицательной полярности электрода с малым радиусом кривизны это происходит автоматически за счет генерации убегающих электронов. О формировании диффузного разряда при образовании молний в атмосфере Земли информации нет, но известно, что предварительная ионизация в воздухе осуществляется космическим излучением [28]. Можно предположить, что эта стадия формирования четочных структур отличается в естественных и лабораторных условиях.

Для начала процесса формирования отдельных четок необходимо появление сгустка плазмы с высокой концентрацией электронов и ионов. Появление первого сгустка плазмы с высокой концентрацией электронов и ионов в данных

экспериментах связано с применением электрода в виде иглы с малым радиусом кривизны (см. фотографии на рис. 5 и 7), или с образованием катодного пятна на электроде с малым радиусом кривизны, а также с развитием искровых лидеров (рис. 2). В природных условиях, это начало формирования ступенчатого отрицательного лидера, который обеспечивает ступенчатое продвижение канала молнии [10, 11, 29]. Далее, электрическое поле вытесняется из плотной плазмы и конденстрируется на кончике лидера (искрового лидера), что приводит к генерации пучка убегающих электронов и к повторному формированию диффузного разряда в наших экспериментах и улучшению однородности разряда в природных услови-

ях. Однако диффузный разряд экранирует кончик лидера (четки), что приводит к ослаблению электрического поля в этой области, а также к уменьшению числа убегающих электронов. В этих условиях диффузный разряд не может обеспечить протекание полного тока и формируется канал в виде отдельной четки с большой плотностью тока. Стягивание разряда (образование четки) обеспечивает дополнительный нагрев локальной области и увеличение плотности тока в данном участке разрядного промежутка. Далее процесс повторяется, электрическое поле вытесняется из плотной плазмы образовавшейся четки и концентрируется на ее кончике. Это приводит к новому циклу генерации убегающих электронов и формированию области диффузного разряда за четкой и т.д. Отметим, что в лабораторных условиях можно наблюдать последовательность четок, имеющих слабую интенсивность излучения, которая не достигает противоположного электрода. Такая последовательность четок видна в центре вверху на рис. 2а и обозначена тремя стрелками, которые находятся одна за другой.

После замыкания промежутка последовательностью четок, через них проходит искровой канал, интенсивность свечения которого маскирует свечение отдельных четок на фоне излучения искрового канала. Таким образом, отдельные четки легко зарегистрировать в стадии их формирования, при ограничении длительности импульса тока разряда. Искровой канал в этих условиях не должен успевать сформироваться. Четки также хорошо заметны после формирования слаботочного искрового канала при микросекундной длительности импульса тока, рис. 7.

При атмосферных разрядах четочная молния наблюдается очень редко, см. [7]. Мы считаем, что причиной этого является возвратный удар (главный разряд) в природной молнии [29]. За счет протекания большого тока неоднородности в канале молнии, которые образовались на стадии ее формирования, не заметны. По-видимому, четочная структура будет хорошо заметна только при сравнительно малых токах главного разряда. Результаты данной работы подтверждают это предположение. Стабильное формирование четочной структуры разряда было получено только на установке № 3 за счет уменьшения тока разряда по сравнению с током разряда на установках № 1 и № 2. На установке № 3 напряжение на промежуток подавалось от импульсного трансформатора, что ограничивало ток разряда. Ток через промежуток увеличивался до сотен ампер только в начальной стадии разряда (первый пик тока на рис. 4а и б) и при формировании четок и искры (второй пик тока на рис. 4а и б) — за счет разрядки емкости кабеля длиной 60 см. Уменьшение напряжения на промежутке при малом изменении тока через промежуток после второго

выброса тока было обусловлено малым сопротивлением искрового канала по сравнению с сопротивлением диффузного разряда.

Величина тока разряда после второго короткого выброса существенно не изменялась в связи с тем, что волновое сопротивление импульсного трансформатора намного больше сопротивления плазмы диффузного разряда в этих условиях. Соответственно, и при диффузном разряде, и при искровом разряде, амплитуда тока через промежуток определялась волновым сопротивлением трансформатора. Выбросы (короткие пики) тока на 4а и б обусловлены разрядом через промежуток отрезка кабеля с волновым сопротивлением 75 Ом, соединяющим вторичную обмотку импульсного трансформатора с разрядной камерой.

## 5. УСЛОВИЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЧЕТОК ПРИ АТМОСФЕРНЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ РАЗРЯДАХ

Из литературы [7, 12] известно, что четочная молния наблюдается после прохождения линейной молнии. В лабораторных разрядах [13–15] четочная структура разряда регистрируется не только после, но и до замыкания промежутка искрой. Проведем анализ процессов, которые могут привести к наблюдениям четочной молнии после формирования линейной или после замыкания первичных четок искрой предполагая, что распределение начального энерговклада по длине линейной молнии (искры) неоднородно.

При мощном энерговкладе в газ возможно появление областей возбуждения, излучение которых может объяснить свечение четок. Основным условием их наблюдения можно считать именно достаточно высокие мощности энерговклада, поскольку в этом случае так или иначе происходит существенный переход энергии в нагрев газа. В широком спектре мощностей и разновидностей накачки (см. ниже) появляются образования, время жизни и размер которых хорошо оцениваются соотношением (см. следующую формулу), что позволяет надеяться на их единую природу. Соответственно, такой же природой вполне могут обладать и четки четочной молнии. Отдельным вопросом, заслуживающим внимания, является вопрос о предельных размерах четок, обладающих такой природой, но он не рассматривается в данной работе. Согласно снимкам, полученным в Смитсоновской астрофизической обсерватории [9], известные размеры четок лежат в диапазоне от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров.

В результате возбуждения воздуха при разряде получается среда с высокой температурой, что приводит к эффективному заселению низкоэнергетических состояний атомов и молекул [9, 30,

31], излучение которых и воспринимается свидетелями данного явления.

Время теплопроводностного охлаждения зависит от радиуса рассматриваемого образования и хорошо оценивается величиной

$$\tau^{-1} \approx \frac{\chi}{(R/2.4)^2}.$$

Для значений  $R = 20$  см, характеризующих средний размер четок четочной молнии в природных условиях и следующих параметров: среднеквадратичная скорость  $v_T \sim 10^5$  см/с, концентрация нейтральных атомов и молекул, соответствующих температуре возбужденной области  $T \sim 1$  эВ,  $N \sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, коэффициент диффузии можно оценить, как

$$\chi = v_T l = \frac{v_T}{\sigma_{at} N} \approx 100 \text{ см}^2/\text{с},$$

где  $\sigma_{at} \sim 10^{-15}$  см<sup>2</sup> – характерное сечение атомного взаимодействия, что приводит к  $\tau \sim 1$  с.

Время излучения светящихся образований для воздуха за счет потерь энергии в результате теплового излучения можно оценить [30, 31], исходя из уравнения

$$\frac{7}{2} NV \frac{dT}{dt} = -\xi \sigma T^4 S,$$

где  $V$  – объем возбужденной области,  $\sigma$  – коэффициент Стефана–Больцмана,  $S$  – площадь поверхности возбужденной области,  $\xi$  – коэффициент теплового излучения воздуха.

Приняв начальную температуру  $T_0 \approx 1$  эВ,  $R(T_0) \approx 20$  см, используя условие  $p = \text{const} = 100$  кПа, получим  $N \approx 10^{18}/T$  см<sup>-3</sup>,  $R \approx 20T^{1/3}$  см. Учитывая протабулированные в [32] значения  $\xi$ , имеем

$$\frac{dT}{dt} \approx -187T^{7.47},$$

где  $t$  выражено в секундах, а  $T$  – в эВ [30, 31]. Для времени остывания до температуры  $T$  имеем

$$t = -\int_{T_0}^T \frac{dT}{187T^{7.47}} \approx \frac{8.26 \times 10^{-4}}{T^{6.47}}$$

и при  $T < 0.4$  эВ, время остывания  $t > 0.32$  с. Отметим сразу, что  $t$  сверху ограничено временем порядка секунды, определяемым процессом теплопроводности.

Видно, что время жизни четок четочной молнии  $t \approx 1$  с при радиусе четок  $R \approx 20$  см можно объяснить в данном подходе, если температура четок составляет порядка 0.5 эВ. В этом случае плот-

ность энергии рассматриваемых образований составляет примерно

$$\rho \sim \frac{3NT}{2} \approx 0.1 \text{ Дж/см}^3,$$

а степень ионизации  $\alpha$  излучающего объема можно оценить, используя формулу Саха–Больцмана. Для  $T_e \approx T = 0.5$  эВ (6000 К) в азоте получаем  $N_e \approx (1-6) \times 10^{13}$  см<sup>-3</sup> или  $a = 10^{-5}-10^{-4}$ .

Итак, представленные выше образования могут объяснить природу четок четочной молнии. Время жизни образований хорошо коррелирует с наблюдаемыми размерами четок ( $t \approx 1$  с при радиусе четок  $R \approx 20$  см). Предельное время жизни таких образований порядка секунды, что соответствует предельным временам жизни наблюдаемых в природе четочных молний. Эти образования представляют собой слабоионизованную плазму с газовой температурой  $T \approx 0.5$  эВ (6000 К), плотность энергии которой приближенно равна 0.1 Дж/см<sup>3</sup>, а степень ионизации  $10^{-4}-10^{-5}$ . Время их жизни определяется процессами теплопроводности и излучательной способностью воздуха и составляет величину  $t \approx 0.2-1$  с для радиусов образований  $R \approx 20$  см.

Время существования рассматриваемых здесь плазменных образований существенно зависит от размеров возбужденной области. При уменьшении  $R$  время жизни будет также уменьшаться. Подробный анализ показывает, что времена жизни различных искусственно полученных образований в этом случае хорошо коррелируют с их размерами [31]. В частности, такая природа светящихся областей объясняет различные объекты, подробно описанные в монографии [7], огненные шары, наблюдавшиеся в подводных лодках [7, 33, 34], плазмоиды, полученные в ВЧ- и СВЧ-разрядах [7, 35–38], светящиеся образования, полученные в эрозионном разряде [39] (см. также [40, 41]), долгоживущие плазмоиды, получаемые при иницировании разряда во влажном воздухе [42] (см. также [40, 41]), долгоживущие плазменные образования в установках с индуктивным накопителем энергии [43], цепочку образований, случайно наблюдавшуюся из окна [12, 44, 45].

Поперечный размер светящихся областей можно оценить, как  $R \sim 0.05$  мм (рис. 4, 6) и  $R \sim 0.2$  мм (рис. 7). Оба рассмотренных выше процесса, ответственные за охлаждение плазмы масштабируются множителем  $R^2$ , следовательно, получаем, что время жизни излучающих областей, полученных в эксперименте, должно составлять  $(1-5) \times 10^{-8}$  с в первом и  $(0.2-1) \times 10^{-6}$  с во втором случае, если данные образования имеют описанную выше природу. Это хорошо согласуется с приведенными данными. Суммарное время существования четки на рис. 4 составляет более

25 нс, на рис. 6 – не менее 40 нс (рис. 5). На рис. 7 суммарное время существования четки не менее 600 нс.

Размер светящейся области может отличаться от размера возбужденной области. Для большей уверенности в правильности рассматриваемого выше предположения о природе светящихся объектов, полученных в эксперименте, необходимо знать профиль концентраций возбужденных и ионизованных атомов и молекул. Представленные выше экспериментальные данные по длительности свечения четок можно считать подтверждением природы светящихся образований в атмосферных разрядах [9, 30, 31], во всяком случае, они не противоречат ей.

Формирование неоднородных структур при импульсном пробое наносекундной длительности в щелевых разрядах [46], по-видимому, имеет другую природу, чем формирование четочной структуры в лабораторных и природных разрядах атмосферного давления. Однако не исключено, что это может быть связано с потоками электронов больших энергий, но при другой последовательности процессов при низких и средних давлениях.

Как уже отмечено выше, очень редкое наблюдение четочной молнии при атмосферных разрядах можно объяснить наличием возвратного удара, который также называют главным разрядом. За счет протекания большого тока неоднородности свечения канала молнии сглаживаются. Поэтому при атмосферных разрядах четочная молния обычно на интегральных фотографиях не наблюдается (см. [7]). По-видимому, четки становятся видны только при сравнительно малых токах главного разряда. Результаты данной работы подтверждают такое объяснение: стабильное формирование четочной структуры разряда было получено за счет уменьшения тока разряда на установке № 3 по сравнению с током разряда на установках № 1 и № 2.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что при подаче импульсов напряжения на промежуток сантиметровой длины с неоднородным электрическим полем, достаточно легко реализовать форму разряда, состоящую из плазменных образований, образующих структуру аналогичную четочной молнии. С помощью четырехканальной ICCD камеры с наносекундным временным разрешением в свечении плазмы разряда в воздухе атмосферного давления зарегистрировано формирование как одной, так и нескольких четок, число которых достигало восьми. Отдельные четки при лабораторных разрядах наблюдаются как при их формировании, так и на фоне “затухаю-

щего” искрового канала в заключительной стадии разряда. Однако во втором случае, энергия, которая вводится в искровой канал должна быть ограничена. Четки формируются в промежутке острие–плоскость после диффузной стадии разряда, а затем их свечение маскируется излучением искрового канала, который, проходя через них, за короткое время замыкает промежуток. При увеличении длительности фронта импульса напряжения до сотен наносекунд и уменьшении тока разряда вероятность наблюдения четок увеличивается, достигая в определенных условиях 100%.

Представленные данные по времени свечения четок, полученных в лабораторных условиях, после прохождения через них искры можно объяснить исходя из выдвинутого в [9, 30, 31] предположения о различных скоростях охлаждения плазмы при изменении удельных энергозатрат.

Экспериментальная часть данной работы поддержана грантом РФФИ (проект № 18-52-53003\_ГФЕН\_а).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pasko V.P. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2008. V. 50. P. 4050.
2. Raizer Y.P., Milikh G.M., Shneider M.N. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. P. A00E42.
3. Fullekrug M., Diver D., Pincon J.-L., Renard J.-B., Phelps A.D.R., Bourdon A., Helling C., Blanc E., Honary F., Kosch M., Harrison R.G., Sauvaud J.-A., Lester M., Rycroft M., Horne R.B., Soula S., Gaffet S. // Surv. Geophys. 2013. V. 34. P. 1.
4. Siingh D., Singh R.P., Kumar S., Singh A.K., Singh A.K., Patil M.N., Singh Sh. // J. Atmos. Solar-Terrestrial-Phys. 2015. V. 134. P. 78.
5. Chanrion O., Neubert T., Mogensen A., Yair Y., Sten-del M., Singh R., Siingh D. // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 44. P. 496.
6. Uman M. // J. Atmos. Terr. Phys. 1962. V. 24. P. 43.
7. Barry J.D. Ball Lightning and Bead Lightning. N.Y.: Plenum Press, 1980.
8. Тумакаев Г.К. // ЖТФ. 1995. Т. 65. С. 52.
9. Бойченко А.М. // Физика плазмы. 1996. Т. 22. С. 1012.
10. Uman M.A., Rakov V.A. Lightning Physics and Effects. Cambridge Univ. Press, 2003.
11. Ludwig G.O., Saba M.M.F. // Phys. Plasmas. 2005. V. 12. P. 093509.
12. Бычков В.И. // Proc. 15<sup>th</sup> Russian Confer. Cold Nucl. Transmutation of Chemical Elements and Ball Lightning. Dagomys city of Sochi. 1–8 October 2008. M., 2009. P. 139.
13. Тарасенко В.Ф., Белоплотов Д.В., Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. С. 661.

14. *Vayanganie S.P.A., Cooray V., Rahman M., Hettiarachchi P., Diaz O., Fernando M.* // Phys. Lett. A. 2016. V. 380. P. 816.
15. *Тарасенко В.Ф., Белоплотов Д.В.* // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. С. 214.
16. Generation of runaway electron beams and X-rays in high pressure gases. V. 1: Techniques and Measurements/ Ed.V.F. Tarasenko. N.Y.: Nova Science Publ., Inc., 2016. 405 p.
17. *Babaeva N.Y., Zhang C., Qiu J., Hou X., Tarasenko V.F., Shao T.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2017. V. 26. P. 085008.
18. *Dwyer J.R., Rassoul H.K., Al-Dayeh M., Caraway L., Chrest A., Wright B., Jordan D.M.* // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. P. L01803.
19. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. Долгопрудный: Издательский дом Интеллект, 2009. 736 с.
20. *Тарасенко В.Ф., Бакит Е.Х., Бураченко А.Г., Костыря И.Д., Ломаев М.И., Рыбка Д.В.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. С. 111.
21. *Тарасенко В.Ф., Бакит Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. С. 29.
22. Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges / Ed. V.F. Tarasenko. N.Y.: Nova Science Publ., Inc., 2014. 598 p.
23. *Ретер Г.* Электронные лавины и пробой в газах. М.: Из-во Мир, 1968. 390 с.
24. *Shao T., Tarasenko V.F., Zhang Ch., Lomaev M.I., Sorokin D.A., Yan P., Kozyrev A.V., Baksh E.K.* // J. Appl. Phys. 2012. V. 111. P. 023304.
25. *Naidis G.V., Tarasenko V.F., Babaeva N.Yu., Lomaev M.I.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2018. V. 27. P. 013001.
26. *Тарасенко В.Ф., Найдис Г.В., Белоплотов Д.В., Костыря И.Д., Бабаева Н.Ю.* // Физика плазмы. 2018. Т. 44. С. 652.
27. *Бакит Е.Х., Бураченко А.Г., Ерофеев М.В., Тарасенко В.Ф.* // Физика плазмы. 2014. Т. 40. С. 480.
28. *Gurevich A.V., Milikh G.M., Roussel-Dupre R.* // Phys. Lett. A. 1992. V. 165. P. 463.
29. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001.
30. *Бойченко А.М.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. С. 131.
31. *Voichenko A.M.* // Phys. Wave Phenomena. 2005. V. 13. P. 104.
32. Физические величины. Справочник / Ред. И.С. Григорьев, Е.З. Мейлихов. М.: Энергоатомиздат, 1991.
33. *Silberg P.A.* // J. Geophys. Res. 1962. V. 67. P. 4941.
34. *Silberg P.A.* // Problems of Atmospheric and Space Electricity /Ed. S.C. Coroniti. Amsterdam: Elsevier, 1965.
35. *Powell J.R., Finkelstein D., Zucker M.S., Manwaring J.R.* // American Physical Society, 8th Annual Meeting, Division of Plasma Physics, 1966.
36. *Powell J.R., Finkelstein D.* // Adv. Geophysics. 1969. V. 13. P. 141.
37. *Powell J.R., Finkelstein D.* // American Scientist. 1970. V. 58. P. 262.
38. *Зарин А.С., Кузовников А.А., Шибков В.М.* Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. М.: Нефть и газ, 1996.
39. *Шабанов Г.Д.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. С. 81.
40. *Егоров А.И., Степанов С.И., Шабанов Г.Д.* // УФН. 2004. Т. 174. С. 107.
41. *Шабанов Г.Д., Соколовский Б.Ю.* // Физика плазмы. 2005. Т. 31. С. 560.
42. *Егоров А.И., Степанов С.И.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. С. 102.
43. *Фуров Л.В.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. С. 102.
44. *Stenhoff M.* // J. Meteorology. 2004. V. 29. P. 67.
45. *Voichenko A.M.* // J. Meteorology. 2004. V. 29. P. 73.
46. *Ashurbekov N.A., Iminov K.O., Ratazanov A.R.* // J. Phys.: Confer. Ser. 2017. V. 830. P. 012024.