

04

Формирование микроканальной структуры искрового разряда в воздухе в промежутке „острие—плоскость“

© А.А. Тренькин, К.И. Алмазова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, Е.В. Горелов, И.В. Морозов, С.Ю. Харитонов

Российский Федеральный ядерный центр Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,

607190 Саров, Россия

e-mail: alexey.trenkin@gmail.com

Поступило в Редакцию 12 августа 2021 г.

В окончательной редакции 25 ноября 2021 г.

Принято к публикации 26 ноября 2021 г.

Методом теневого фотографирования исследовано формирование микроканальной структуры искрового разряда в промежутке „острие (катод)—плоскость“ длиной 1.5 mm в воздухе атмосферного давления. Зарегистрированы изображения с последовательным уменьшением диаметров микроканалов и увеличением их количества в прикатодной области на временном интервале 5 ns. Полученные данные интерпретированы в рамках механизма формирования микроструктуры за счет неустойчивости фронта волны ионизации. Выполнены оценки параметров, характеризующих процесс образования микроструктуры, и получено их удовлетворительное согласие с экспериментальными данными.

Ключевые слова: искровой разряд, ионизационная неустойчивость, микроструктура, метод теневого фотографирования.

DOI: 10.21883/JTF.2022.03.52130.235-21

Введение

Востребованность практических применений электрических разрядов в плотных газах стимулирует интерес к их изучению для повышения эффективности существующих и развития новых газоразрядных технологий. Несмотря на длительный период исследований и большой объем полученных данных, касающихся различных аспектов газоразрядных процессов, ряд явлений до сих пор слабо изучен. Одним из них является формирование микроструктуры в начальной фазе разрядов в воздухе атмосферного давления, когда канал представляет собой совокупность большого числа микроканалов (филаментов) [1–7]. Изначально микроструктура разряда была обнаружена методом автографов (отпечатков) на поверхности плоского электрода (см. [5–7] и ссылки в них). Микроканальная структура в объеме разрядного промежутка была зарегистрирована относительно недавно с применением метода лазерного зондирования и основанных на нем теневых и интерференционных методиках [1–4]. Сложность экспериментального исследования данного явления определяется необходимостью обеспечения высокой разрешающей пространственной (микрометрового уровня) и временной (нано- и субнаносекундного уровня) способности диагностики. Отметим, что оптическими и электронно-оптическими методами микроструктура была не разрешима [1].

Вместе с тем, если факт наличия микроструктуры исследованных разрядов не вызывает сомнения, то вопрос о механизме ее формирования до сих пор остается открытым.

Одной из возможных причин филаментации разряда может являться ионизационно-перегревная неустойчивость, развитием которой объясняется, например, формирование множества нитевидных каналов диаметром от 60 до 100 μm в изначально однородном диффузном разряде в аргоне при давлении 300 Torr в промежутке острие—плоскость длиной 3 mm [8]. Однако там формирование микроструктуры регистрировалось спустя 100–400 ns от начала пробоя, в отличие от условий экспериментов [1–4], где микроканалы регистрируются уже на первых наносекундах после пробоя. Оценки показывают, что за столь короткое время развитие ионизационно-перегревной неустойчивости в условиях рассматриваемых экспериментов маловероятно [6].

Более подходящим является объяснение формирования филаментов за счет неустойчивости фронта волны ионизации, о чем свидетельствует ряд расчетно-теоретических работ [6,7,9–13]. Вместе с тем до настоящего времени этому отсутствует достоверное экспериментальное подтверждение, что может быть связано со сложностью регистрации процессов в фазе распространения волны ионизации. Данное обстоятельство обусловлено как короткой длительностью этой фазы, так и относительно низкими значениями концентрации электронов и градиентом плотности газа в этот момент, что не позволяет регистрировать микроструктуру используемыми методиками [1–4].

В работах [1,2] была реализована методика исследования пространственной структуры разряда методом теневого фотографирования с пространственным разрешением 5 $\mu\text{m}/3\text{pixel}$ при длительности лазерного импульса на полувысоте 6 ns. В этих исследованиях была

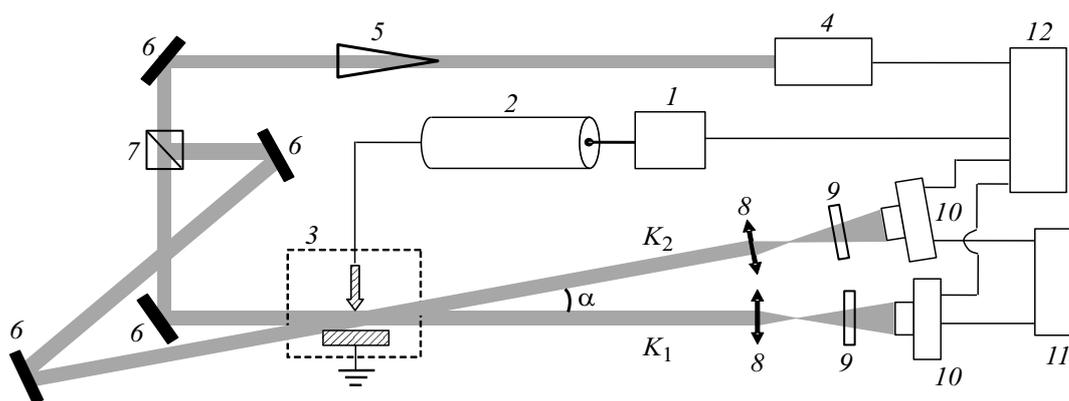


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда: 1 — генератор импульсов напряжения, 2 — кабельная линия, 3 — разрядный промежуток, 4 — источник зондирующего сигнала (лазер), 5 — коллиматор, 6 — поворотное зеркало, 7 — светоделительный элемент, 8 — объектив, 9 — светофильтры, 10 — электронно-оптический регистратор, 11 — персональный компьютер, 12 — блок синхронизации. Угол α — между лазерными каналами K_1 и K_2 составляет $\alpha = 15^\circ$.

зарегистрирована микроканальная структура искрового разряда в воздухе атмосферного давления в промежутке „острие–плоскость“ на начальной стадии его развития. Установлено, что канал представляет собой пучок большого числа микроканалов. На временах от единиц до десятков ns происходит развитие микроканалов от острия вглубь разрядного промежутка и их расширение. Затем наблюдается формирование общего фронта цилиндрической ударной волны канала искры и его радиальное движение. Существенным недостатком данной методики являлась однокадровость, что ограничивало возможности исследования динамики разряда.

Настоящая работа является продолжением исследований [1,2]. Здесь в развитие методики теневого фотографирования реализован ее двухкадровый вариант, что значительно расширяет возможности получения данных о процессах, сопровождающих газовые разряды. В работе представлены результаты исследования формирования микроструктуры в искровом разряде.

1. Экспериментальная аппаратура и методика

Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Часть элементов схемы подробно описаны в [1,2]. Генератор импульсов напряжения обеспечивал на выходе импульс отрицательной полярности амплитудой 25 kV и длительностью фронта по уровню 0.1–0.9 около 7 ns. Через кабельную линию импульс подавался на разрядный промежуток. Измерения напряжения и тока осуществлялись на выходе генератора импульсов напряжения соответственно емкостным делителем и резистивным шунтом. Временное разрешение делителя и шунта — менее 1 ns. Регистрация сигналов производилась осциллографом с полосой пропускания 500 MHz и скоростью оцифровки 2 Gs/s.

Электродная система имела геометрию „острие–плоскость“. Осесимметричный острейный электрод изготов-

лен из нержавеющей стали и имел длину 19 mm, диаметр 14 mm, угол при вершине 36° и радиус кривизны 0.15 mm. В качестве плоского электрода использовался электрод, изготовленный из алюминиевого сплава с рабочей частью, близкой по форме к шаровому сегменту диаметром 4.5 cm толщиной 1.5 cm. Межэлектродный зазор составлял 1.5 mm.

В составе стенда использовалась система оптической регистрации разряда. Система включала в себя источник зондирующего излучения — твердотельный лазер (длина волны 532 nm, длительность импульса на полувысоте 6 ns), объектив, светофильтры и цифровую электронно-оптическую камеру. Плоскопараллельный пучок лазерного излучения, проходя через область разряда перпендикулярно оси электрода–острия, регистрировался электронно-оптической камерой. В области формирования разряда поперечный размер лазерного пучка составлял примерно 1 cm и имел гауссов профиль. Поскольку межэлектродный зазор значительно меньше размера пучка, это обеспечивало достаточно однородное поле лазерного излучения в области разряда.

На базе этой системы реализована методика теневого фотографирования. В настоящих экспериментах в отличие от проведенных ранее [1,2] для теневого метода использовалась двухлучевая оптическая схема, что обеспечивало получение двух кадров за импульс. Угол между лазерными лучами составлял около 15° . Для каждого луча изображение в области разрядного промежутка строилось с помощью объектива с фокусным расстоянием 23 cm на фотокатод электронно-оптического регистратора. Коэффициент увеличения равен десяти. Экспозиция каждого кадра определялась длительностью импульса лазера. Изменением разности оптической длины пути лучей можно было варьировать временной интервал между кадрами тенеграмм. В экспериментах этот интервал составлял 5 ns. Временная привязка кадров осуществлялась относительно момента пробоя, а характеризующее их время соответствует началу кадра.

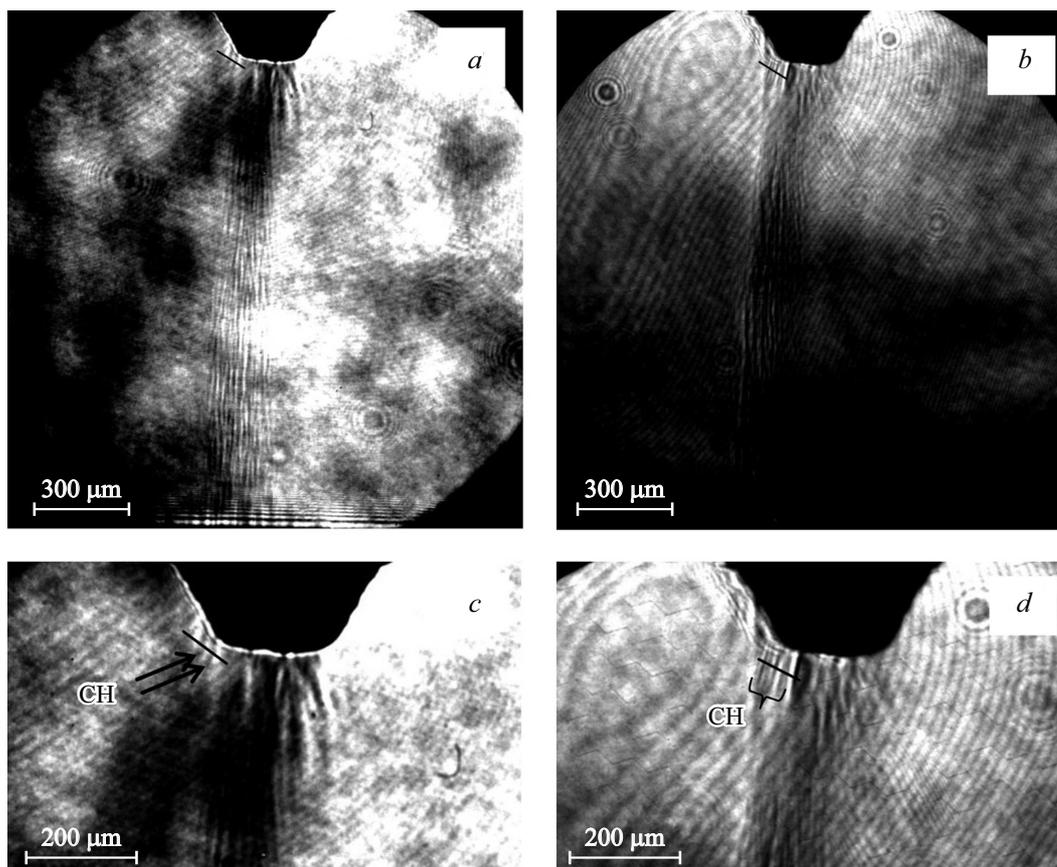


Рис. 2. Тенеграммы разряда в одном импульсе в момент времени 9 (a) и 14 ns (b); c и d — соответствующие увеличенные фрагменты. Черная линия (a, c — длина 120 μm, b, d — 90 μm), пересекающая каналы СН, обозначает путь, вдоль которого строилась степень почернения изображения.

Сдвигом момента запуска лазера и электронно-оптического регистратора относительно момента пробоя обеспечивалась визуализация различных стадий разрядного процесса. Разрешающая способность оптической системы составляла $5\mu\text{m}/3\text{pixel}$.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Разряд исследовался в воздухе при нормальных условиях. После пробоя промежутка в разрядной цепи возникал колебательный процесс с экспоненциальным затуханием тока и напряжения. Период колебаний составлял $0.6\mu\text{s}$, амплитуда тока и время его затухания соответственно 1kA и $1.2\mu\text{s}$. При этом на осциллограммах выделялись два характерных момента времени: появление напряжения на разрядном промежутке и пробой. Среднее значение задержки между ними — 4 ns. За момент пробоя t_{bd} был принят момент начала роста тока и соответственно спада напряжения.

Как свидетельствуют результаты проведенных ранее исследований [1,2], динамика разряда в начальной фазе представляется следующей. В предпробойной стадии возникает слабосветящийся диффузный канал и катод-

ные пятна, которые дают начало искровому каналу. Канал обладает микроструктурой, которая регистрируется на тенеграммах уже в первые наносекунды после пробоя. До момента 15–20 ns диаметр искры практически не меняется, ток нарастает, а концентрация электронов в этот момент достигает максимального значения, после чего происходит радиальное расширение канала с образованием на его границе цилиндрической ударной волны.

Во введении была отмечена проблематичность регистрации процесса формирования микроструктуры: высокие скорости, обусловленные значительным перенапряжением разрядного промежутка в предпробойной фазе, и относительно низкие для регистрации значения концентрации электронов и градиентов плотности газа. Однако после формирования канала разряда зачастую наблюдается образование запаздывающих боковых каналов, берущих свое начало на смещенных от осевой области зонах катода. В этой фазе процессы развиваются при меньших электрических полях, что обуславливает их более низкую скорость.

Полученные тенеграммы (рис. 2) обнаружили вблизи боковой поверхности острейного электрода каналы, развивающиеся после формирования основного канала, а использование в настоящих экспериментах двухканд-

рового режима теневого фотографирования позволили зарегистрировать их динамику.

На тенеграмме (рис. 2, *a, c*) присутствуют два канала, проявляющие себя в виде темных вытянутых областей. Черная линия (*a, c* — длина $120\ \mu\text{m}$, *b, d* — $90\ \mu\text{m}$), пересекающая каналы СН, обозначает путь, вдоль которого строился профиль степени почернения изображения. На рис. 3 представлен данный профиль. Цифрами 1 и 2 обозначены характерные минимумы. Также на рис. 3 приведен профиль степени почернения в отсутствие разряда. Сравнение двух профилей показывает, что темные области на тенеграмме, возникают именно в разряде и не связаны с особенностями поля визуализации, что подтверждает их идентификацию в качестве каналов. Их диаметры, определенные как ширина на полувысоте профиля, составляют $10\text{--}15\ \mu\text{m}$.

Тенеграмма (рис. 2, *b, d*), полученная с интервалом $5\ \text{ns}$ после тенеграммы на рис. 2, *a, c*, обнаруживает на месте нахождения первоначальных каналов несколько каналов меньшего диаметра. Соответствующий профиль степени почернения приведен на рис. 4. Минимумы, предположительно соответствующие каналам, обозначены на этом рисунке цифрами от 1 до 4. Исходя из этого, можно полагать, что количество каналов равно четырем. Обращает на себя внимание общее снижение яркости изображения в этой области по сравнению с картиной без разряда. Кроме того, заметна модуляция профиля. По-видимому, это связано с частичным перекрытием каналов на линии луча лазера. Определенные, как и выше, диаметры каналов составляют от 5 до $10\ \mu\text{m}$, что примерно в два раза меньше, чем диаметры исходных каналов.

Обнаруженные особенности динамики газоразрядной структуры, включающие формирование каналов с последовательным уменьшением диаметра и ростом их количества, позволяют рассматривать данное явление как результат развития неустойчивости ионизационного фронта. Соответствующая модель механизма формирования микроструктуры разряда рассматривалась ранее в [6,7]. На основании этой модели выполним оценки для условий настоящих экспериментов, полагая, что каналы, регистрируемые на тенеграмме рис. 2, *b, d*, сформировались в результате ионизационной неустойчивости фронта каналов, представленных на тенеграмме рис. 2, *a, c*.

Используя данные по чувствительности применяемой методики, можно полагать, что концентрация электронов в каналах составляет не менее $10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ [14]. Столь высокое значение концентрации свидетельствует о том, что развитие неустойчивости происходит не в лавинной, а в плазменной фазе [7]. Для рассматриваемых условий удельное сопротивление плазмы канала составляет $\rho \leq 1\ \Omega\ \text{m}$, тогда максвелловское время релаксации заряда $\tau_M = \varepsilon_0 \rho \leq 10^{-11}\ \text{s}$ не превосходит характерного времени ионизации воздуха электронным ударом $\tau_e \approx 10^{-11}\ \text{s}$ в рассматриваемых полях [15]. Данное обстоятельство позволяет использовать приближение идеальной проводимости плазмы для интересующих нас

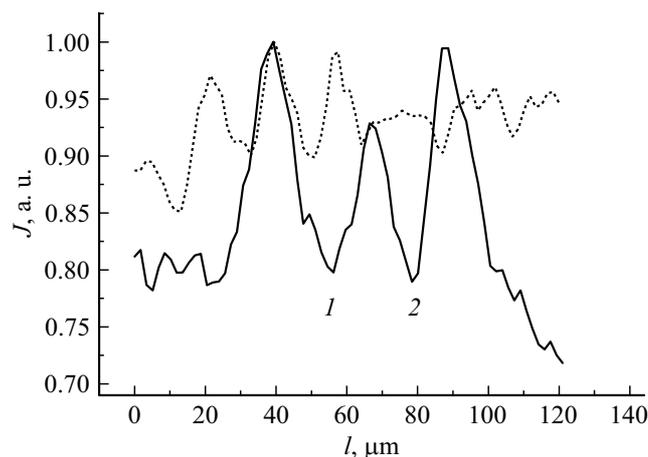


Рис. 3. Профиль степени почернения J изображения тенеграммы вдоль выделенного на рис. 2, *a, c* пути l . Штриховая линия — в отсутствие разряда, сплошная линия — при разряде.

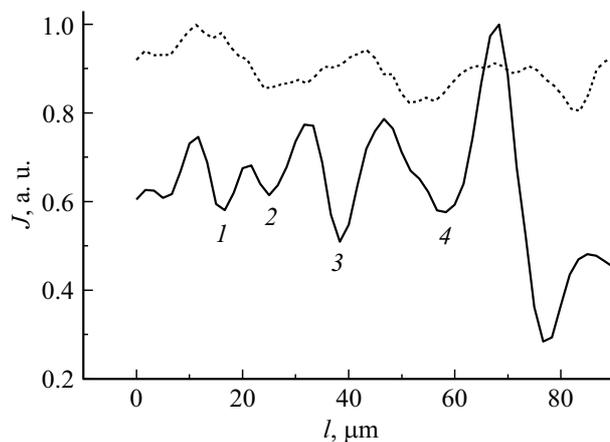


Рис. 4. Профиль степени почернения J изображения тенеграммы вдоль выделенного на рис. 2, *b, d* пути l . Штриховая линия — в отсутствие разряда, сплошная линия — при разряде.

процессов, и оценка времени развития неустойчивости на головке канала (фронте ионизации) дает [9]:

$$t_{\text{ins}} = \lambda / \mu E,$$

где λ — длина волны возмущения потенциала на фронте ионизации, μ — подвижность электронов, E — напряженность электрического поля. Полагая для наших условий $E = 100\text{--}300\ \text{kV/cm}$, $\lambda = 10\text{--}20\ \mu\text{m}$, имеем $t_{\text{ins}} \approx 10\ \text{ps}$. Поскольку t_{ins} порядка τ_e можно полагать, что размер формирующихся микроканалов l_m должен определяться величиной порядка α^{-1} , где α — коэффициент ионизации Таунсенда. Используя для α формулу [16]:

$$\alpha = A p \exp(-B p / E),$$

где p — давление газа, A и B — константы, для рассматриваемых условий, получаем значение $l_m = 2\text{--}15\ \mu\text{m}$, что соответствует зарегистрированным величинам.

Таким образом, полученные в настоящей работе результаты свидетельствуют в пользу механизма формирования микроканальной структуры разряда за счет развития неустойчивости фронта ионизации.

Заключение

С использованием двухкадровой методики теневого фотографирования исследован искровой разряд в промежутке „острие (катод)—плоскость“ длиной 1.5 mm в воздухе атмосферного давления.

Проведенные исследования подтвердили полученные ранее с помощью однокадровой методики данные о динамике разряда на временах от момента пробоя до 100 ns, включающей: развитие микроканалов от острия вглубь разрядного промежутка, расширение микроканалов, формирование общего фронта канала искры, цилиндрической ударной волны и его радиальное движение.

Зарегистрирована динамика развития боковых каналов в прикатодной области во временном диапазоне от 9 до 14 ns, включающая последовательное формирование каналов меньшего диаметра и рост их количества. Диаметр исходного канала составляет 10–15 μm , диаметр последующих каналов — 5–10 μm , при этом наблюдается удвоение количества каналов на масштабе времени, не превышающем 5 ns.

Полученные экспериментальные данные подтверждают предположение о механизме формирования микроканальной структуры за счет неустойчивости ионизационного фронта. Выполнены оценки параметров, характеризующих процесс формирования микроструктуры, которые согласуются с экспериментальными данными и высказанным предположением.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.А. Тренькин, К.И. Алмазова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, Е.В. Горелов, И.В. Морозов, С.Ю. Харитонов. *ЖТФ*, **8** (6), 827 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.06.46011.2511 [А.А. Trenkin, K.I. Almazova, A.N. Belonogov, V.V. Borovkov, E.V. Gorelov, I.V. Morozov, S.Yu. Kharitonov. *Tech. Phys.*, **63** (6), 801 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218060026]
- [2] А.А. Тренькин, К.И. Алмазова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, Е.В. Горелов, И.В. Морозов, С.Ю. Харитонов. *ЖТФ*, **90** (12), 2039 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.12.50119.435-19 [А.А. Trenkin, K.I. Almazova, A.N. Belonogov, V.V. Borovkov, E.V. Gorelov, I.V. Morozov, S.Yu. Kharitonov. *Tech. Phys.*, **65** (12), 1948 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220120270]
- [3] E.V. Parkevich, M.A. Medvedev, A.I. Khirianova, G.V. Ivanenkov, A.S. Selyukov, A.V. Agafonov, K.V. Shpakov, A.V. Oginov. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **28**, 125007 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab518e
- [4] E.V. Parkevich, M.A. Medvedev, G.V. Ivanenkov, A.I. Khirianova, A.S. Selyukov, A.V. Agafonov, Ph.A. Korneev, S.Y. Gus'kov, A.R. Mingalcev. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **28**, 095003 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab3768
- [5] А.Г. Репьев, П.Б. Репин, В.С. Покровский. *ЖТФ*, **77** (1), 56 (2007). [A.G. Rep'ev, P.B. Repin, V.S. Pokrovski'. *Tech. Phys.*, **52** (1), 52 (2007).]
- [6] В.И. Карелин, А.А. Тренькин. *ЖТФ*, **78** (3), 29 (2008). [A.A. Trenkin, V.I. Karelin. *Tech. Phys.*, **53** (3), 314 (2008). DOI: 10.1134/S1063784208030055]
- [7] В.И. Карелин, А.А. Тренькин. *ЖТФ*, **78** (9), 134 (2008). [V.I. Karelin, A.A. Trenkin. *Tech. Phys.*, **53** (9), 1236 (2008). DOI: 10.1134/S106378420809017X]
- [8] Ю.И. Бычков, Ф.И. Суслов, К.А. Тинчурин, А.Г. Ястремский. *ФП*, **17** (2), 196 (1991).
- [9] Э.Д. Лозанский, О.Б. Фирсов. *Теория искры* (Атомиздат, М., 1975)
- [10] О.А. Синкевич. *ТВТ*, **41** (5), 695 (2003).
- [11] M. Arayas, M. Fontelos, J. Trueba. *Phys. Rev. Lett.*, **95** (5), 165001 (2005). DOI: 10.1103/PhysRevLett.95.165001
- [12] A. Rocco, U. Ebert, W. Hundsdorfer. *Phys. Rev. E*, **66**, 035102(R) (2002). DOI: 10.1103/PhysRevE.66.035102
- [13] A. Luque, F. Brau, U. Eber. *Phys. Rev. E*, **78**, 016206 (2008). DOI: 10.1103/PhysRevE.78.016206
- [14] А.А. Тренькин, К.И. Алмазова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, Е.В. Горелов, И.В. Морозов. *ЖТФ*, **91** (2), 255 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.02.50359.217-20 [А.А. Trenkin, K.I. Almazova, A.N. Belonogov, V.V. Borovkov, E.V. Gorelov, I.V. Morozov, S.Yu. Kharitonov. *Tech. Phys.*, **66** (2), 243 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221020225]
- [15] Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. *Физика молнии и молниезащиты* (Физматлит, М., 2001), ISBN 5-9221-0082-3
- [16] Yu.P. Raiser. *Physics of Gas Discharge* (Intelligence, Dolgoprudny, 2009)