

03;04

Прикатодные плазменные и газодинамические процессы при формировании искрового разряда в воздухе атмосферного давления в промежутке острие—плоскость

© К.И. Алмазова¹, А.А. Амирова², А.Н. Белоногов¹, В.В. Боровков¹, В.С. Курбанисмаилов³, Г.Б. Рагимханов³, Д.В. Терешонок⁴, А.А. Тренькин¹, З.Р. Халикова³

¹ Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл., Россия

² Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, Россия

³ Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

⁴ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

E-mail: gb-r@mail.ru

Поступило в Редакцию 2 декабря 2022 г.

В окончательной редакции 3 февраля 2023 г.

Принято к публикации 4 февраля 2023 г.

Методом теневого фотографирования исследовано формирование искрового разряда в промежутке острие (катод)—плоскость длиной 1.5 mm. Зарегистрированы два типа ударных волн: цилиндрическая, создаваемая при расширении канала разряда, и прикатодная, предположительно генерируемая катодными факелами вблизи поверхности острейного электрода. Выполнено расчетно-теоретическое рассмотрение предложенного механизма.

Ключевые слова: газовый разряд, микроструктура, температура электронов, степень ионизации газа.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.08.55127.19448

Импульсные высоковольтные разряды атмосферного давления широко применяются на практике, поэтому активно исследуются на протяжении длительного времени. Одной из особенностей таких разрядов является газодинамика, которая может развиваться на наносекундных временных масштабах, ее исследование возможно с использованием теневых методов (см. работы [1–10] и ссылки в них).

В первых работах [1–4] была показана структура искрового разряда, состоящая из высокопроводящего канала, промежуточной области и радиально расходящейся (цилиндрической) ударной волны (УВ).

В относительно недавних работах [5–10] на основе метода лазерного зондирования и интерференционных методик в геометрии острие—плоскость в воздухе была обнаружена микроструктура искрового разряда, представляющая собой большое число микроканалов. Кроме того, дополнительно была исследована газодинамика: детализирована динамика формирования указанной выше радиальной структуры канала разряда [7,8], а также зарегистрированы полусферические УВ, источники которых расположены на поверхности плоского электрода [6].

В [5–8] методика теневого фотографирования являлась однокадровой. Данное обстоятельство ограничивало возможности изучения динамики газоразрядных процессов. Целью настоящей работы является получение новых данных о газодинамических и плазменных процессах, сопровождающих искровой разряд в воздухе

атмосферного давления, с использованием двухкадрового варианта методики.

Методика проведения эксперимента для разрядной геометрии острие—плоскость в воздухе атмосферного давления и используемое оборудование подробно представлены в [5–8,11]. Отрицательный импульс амплитудой 25 kV и длительностью 7 ns подавался на разрядный промежуток через кабель длиной 7 m. Острие представляло собой осесимметричный электрод из нержавеющей стали со следующими параметрами: длина 19 mm, диаметр 14 mm, угол при вершине 36°, радиус кривизны 0.15 mm.

Система измерения включала в себя двухканальную оптическую систему регистрации разряда с источником зондирующего излучения — твердотельным лазером (длина волны 532 nm, длительность импульса на полувысоте 6 ns) [11], что давало возможность получения двух кадров за импульс с временным интервалом 5 ns. Пространственная разрешающая способность оптической системы — 5 μm на три пикселя. Время экспозиции для каждого кадра определялось длительностью импульса лазера. Временная привязка кадров осуществлялась относительно момента пробоя.

На рис. 1 представлены два кадра тенегрмм разряда, зарегистрированные в одном импульсе. Полученные данные согласуются с ранее опубликованными результатами по формированию микроканальной структуры, цилиндрической ударной волны и расширению высокопроводящего канала в радиальном направлении [5–8].

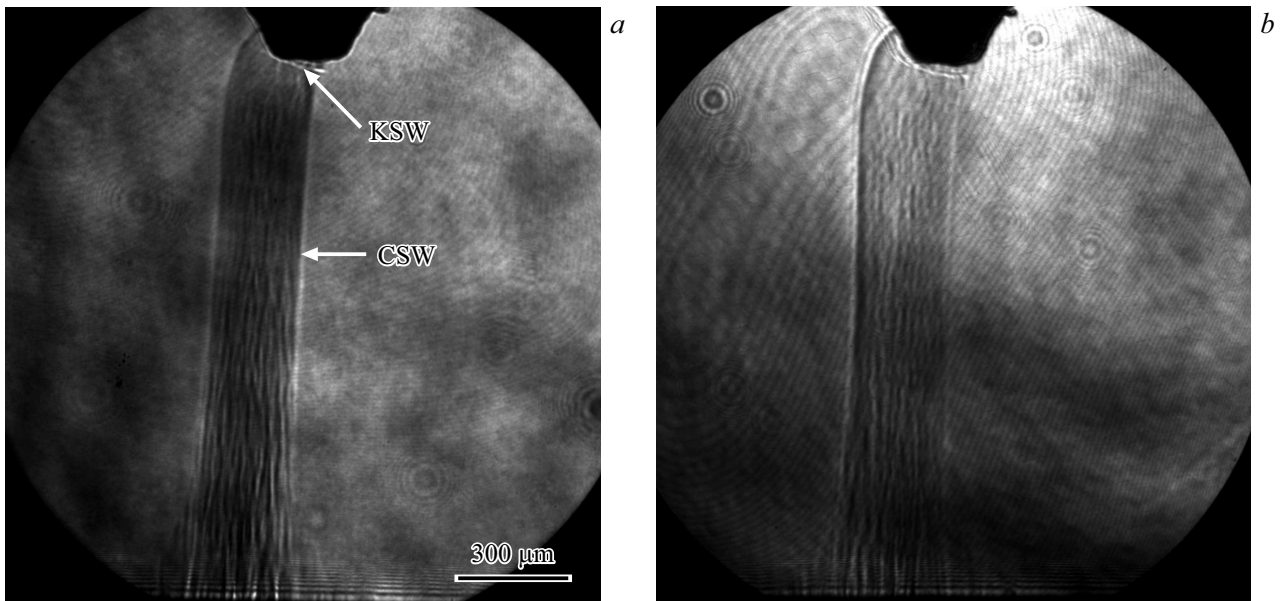


Рис. 1. Тенеграммы, полученные в одном импульсе. *a* — первый кадр, 20 ns после пробоя; *b* — второй кадр, 25 ns после пробоя. KSW — прикатодные ударные волны, CSW — цилиндрические ударные волны. Электрод-острие находится сверху.

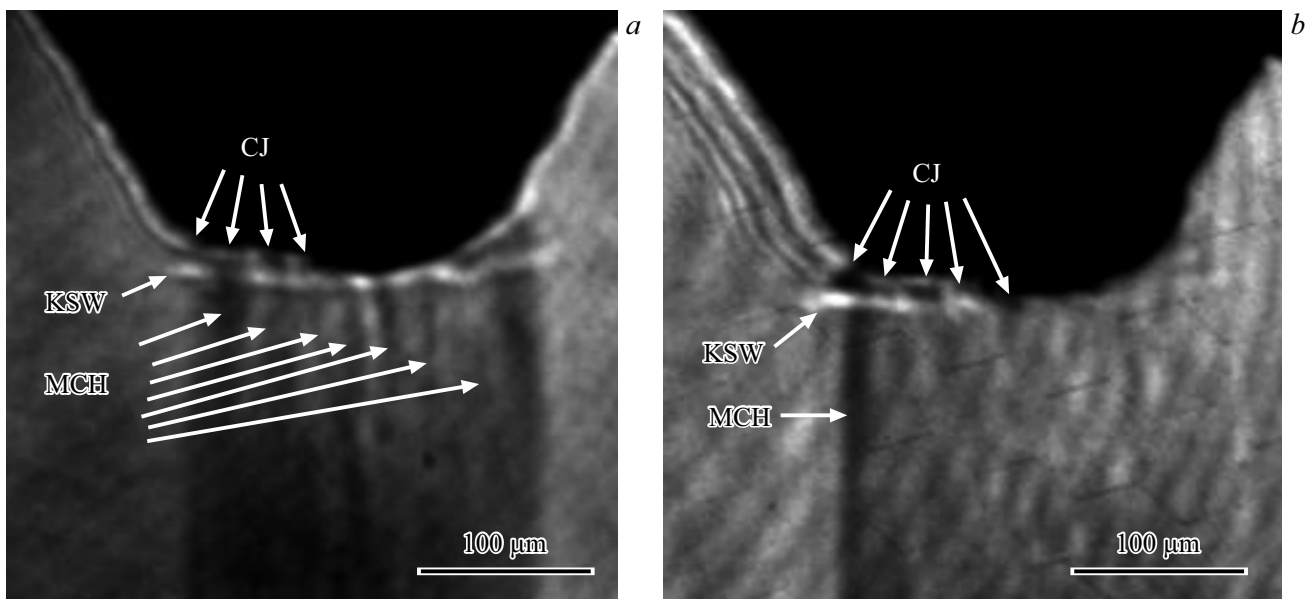


Рис. 2. Тенеграммы в увеличенном масштабе. *a* — первый кадр, 18 ns после пробоя; *b* — второй кадр, 23 ns после пробоя. CJ — катодные факелы, MCH — микроканалы.

Помимо этого тенеграммы обнаруживают вблизи поверхности острейшего электрода новые структурные элементы — узкие (толщиной не более $15\ \mu\text{m}$) яркие протяженные области, отходящие от поверхности катода. В соответствии с экспериментальными данными можно утверждать, что подобного рода структуры фиксируются в интервале времени от 10 до 50 ns после пробоя и распространяются со скоростью $1\text{--}3\ \text{km/s}$. Судя по внешнему виду и значению скорости, данные области можно интерпретировать как ударные волны,

распространяющиеся от катода. В большинстве случаев их форма повторяет профиль поверхности катода. В дальнейшем такие УВ будем называть прикатодными.

Следует особо отметить, что фронт прикатодной УВ зачастую имел достаточно большую длину (до $0.3\ \text{mm}$). Такая картина, по-видимому, соответствует распределенному источнику УВ на поверхности катода или совокупности большого количества синхронизованных источников.

Полученные данные (рис. 2) свидетельствуют о том, что отдельные участки фронта ударной волны создаются катодными факелами. Оценка скорости разлета катодной плазмы дает 1–2 km/s, а ширина факелов составляет 10–15 μm . Области катодных факелов сопряжены с микроканалами, диаметры которых имеют близкие значения.

Отметим, что в работе [9] при близких условиях на тенеграммах также регистрировалось формирование локальных плазменных факелов из электродных пятен (как на острейном, так и на плоском электроде) размером около 30 μm начиная с 0.5 ns после пробоя. Однако о формировании приэлектродных УВ там не сообщалось. В нашем случае катодные факелы и УВ от них на временах менее 10 ns не наблюдались.

Рассмотрим возможность генерации обнаруженных прикатодных УВ за счет движения факелов, состоящих из паров материала катода. Полагая, что размер такого факела превосходит масштаб области, откуда произошел выброс материала, для скорости его разлета в адиабатическом приближении запишем [12]:

$$v = \sqrt{\frac{4\gamma}{(\gamma - 1)m_i}(\varepsilon_{i0} + Z\varepsilon_{e0})}, \quad (1)$$

где ε_{i0} , ε_{e0} — начальная энергия ионов и электронов, $\gamma = 5/3$ — постоянная адиабаты (рассматривается разлет одноатомного газа), m_i — масса иона, Z — его заряд. Полагаем энергию электронов равной энергии Ферми [12], которая связана с концентрацией электронов как $\varepsilon_{e0} \sim n_e^{2/3}$. Начальную энергию ионов для определенности примем равной температуре кипения железа $\varepsilon_{i0} = 0.27 \text{ eV}$ [13]. Полагая, что в начальный момент степень ионизации паров металла удовлетворяет условию $Z\varepsilon_{e0} \ll \varepsilon_{i0}$ (это соответствует концентрации электронов $n_{e0} < 10^{20} \text{ cm}^{-3}$), из выражения (1) получаем $v = \sqrt{\frac{4\gamma\varepsilon_{i0}}{(\gamma-1)m_i}} \approx 2 \text{ km/s}$, что соответствует экспериментальным значениям.

Отметим, что в предположении полной ионизации (а возможно, и многократной ионизации) паров металла в таком факеле, когда энергия Ферми в выражении (1) играет определяющую роль, получим скорости на уровне $v \approx 20\text{--}30 \text{ km/s}$, что наблюдалось во многих экспериментах (см. работу [12] и ссылки в ней).

Далее полагаем, что катодный факел порождает сильную УВ, которая отрывается от факела и распространяется по невозмущенному газу (в нашем случае по воздуху). Тогда температуру на фронте УВ можно оценить как [14]:

$$\frac{T}{T_0} = \frac{2\gamma(\gamma - 1)}{(\gamma + 1)^2} M^2,$$

T_0 — температура невозмущенного газа, $M = V/c$ — число Маха. Для среднего значения скорости УВ $V = 2 \text{ km/s}$, скорости звука в воздухе $c = 345 \text{ m/s}$ при его температуре $T_0 = 300 \text{ K}$ и $\gamma = 1.3$ (чтобы учесть возбуждение колебательных уровней) температура газа

за фронтом УВ оценивается на уровне 1500 K. Отметим, что полученное значение близко к температуре газа в микроканалах [15].

Таким образом, в дополнение к цилиндрической и полусферической УВ результаты представленных исследований обнаруживают еще один тип УВ, сопровождающей формирование искрового разряда, — прикатодную УВ, предположительно генерируемую катодными факелами вблизи поверхности острейного электрода.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-08-01069А).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] И.С. Абрамсон, Н.М. Гегечкори, С.И. Драбкина, С.Л. Мандельштам, *ЖЭТФ*, **17** (10), 862 (1947).
- [2] С.И. Драбкин, *ЖЭТФ*, **21** (4), 473 (1951).
- [3] Н.М. Гегечкори, *ЖЭТФ*, **21** (4), 493 (1951).
- [4] С.Л. Мандельштам, Н.К. Суходрев, *ЖЭТФ*, **24** (6), 701 (1953).
- [5] К.И. Алмазова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, Е.В. Горелов, И.В. Морозов, А.А. Тренькин, С.Ю. Харитонов, *ЖТФ*, **88** (6), 827 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.06.46011.2511 [К.И. Almazova, A.N. Belonogov, V.V. Borovkov, E.V. Gorelov, I.V. Morozov, A.A. Tren'kin, S.Yu. Kharitonov, *Tech. Phys.*, **63** (6), 801 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218060026].
- [6] К.И. Алмазова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, Е.В. Горелов, И.В. Морозов, А.А. Тренькин, С.Ю. Харитонов, *ЖТФ*, **89** (1), 69 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.01.46964.178-18 [К.И. Almazova, A.N. Belonogov, V.V. Borovkov, E.V. Gorelov, I.V. Morozov, A.A. Tren'kin, S.Yu. Kharitonov, *Tech. Phys.*, **64** (1), 61 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219010043].
- [7] 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. Tren'kin, К.И. 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].
- [8] К.И. Алмазова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, В.С. Курбанисмаилов, П.Х. Омарова, Г.Б. Рагимханов, Д.В. Терешонок, А.А. Тренькин, З.Р. Халикова, *Физика плазмы*, **47** (1), 75 (2021). DOI: 10.31857/S0367292121010029 [К.И. Almazova, A.N. Belonogov, V.V. Borovkov, V.S. Kurbanismailov, P.Kh. Omarova, G.B. Ragimkhanov, D.V. Tereshonok, A.A. Trenkin, Z.R. Khalikova, *Plasma Phys. Rep.*, **47** (1), 73 (2021). DOI: 10.1134/S1063780X21010025].
- [9] 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** (12), 125007 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab518e

- [10] 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. Mingaleev, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **28** (9), 095003 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab3768
- [11] А.А. Тренькин, К.И. Алмазова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, Е.В. Горелов, И.В. Морозов, С.Ю. Харитонов, *ЖТФ*, **92** (3), 348 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.03.52130.235-21 [A.A. Tren'kin, K.I. Almazova, A.N. Belonogov, V.V. Borovkov, E.V. Gorelov, I.V. Morozov, S.Yu. Kharitonov, *Tech. Phys.*, **92** (3), 277 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.03.53257.235-21].
- [12] С.П. Бугаев, Е.А. Литвинов, Г.А. Месяц, Д.И. Проскуровский, *УФН*, **115** (1), 101 (1975). DOI: 10.3367/UFNr.0115.197501d.0101 [S.P. Bugaev, E.A. Litvinov, G.A. Mesyats, D.I. Proskurovskii, *Sov. Phys. Usp.*, **18** (1), 51 (1975). DOI: 10.1070/PU1975v018n01ABEH004693].
- [13] Б.М. Драпкин, В.А. Руденко, *ЖТФ*, **62** (9), 125 (1992). <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/25082>
- [14] А.Л. Великович, А.А. Либерман, *Физика ударных волн в плазме* (Наука, М., 1987).
- [15] V.I. Karelin, A.A. Trenkin, in *Runaway electrons preionized diffuse discharges*, ed. by V.F. Tarasenko (Nova Science Publ., Inc., N.Y., 2014), p. 173–240.