Анализ рабочих параметров дугового разряда в плазмотроне переменного тока с кольцевыми электродами

© Ю.Д. Дудник, А.А. Сафронов, В.Н. Ширяев, М.И. Васильев, О.Б. Васильева

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: julia_dudnik-s@mail.ru

Поступило в Редакцию 28 апреля 2026 г.
В окончательной редакции 1 сентября 2026 г.
Принято к публикации 23 октября 2026 г.

Приведены результаты исследования однофазного плазмотрона с кольцевыми электродами мощностью до 10 kW. Эксперименты проводились с использованием медных кольцевых электродов в диапазонах расхода плазмообразующего газа (воздуха) до 3.14 g/s. Производилась запись осциллограмм тока и напряжения электрической дуги с одновременной скоростной видеосъемкой дугового разряда. Установлен характер привязки дуги и проведен анализ временны́х и пространственных характеристик дугового разряда. Определена температура возбуждения атомов плазмы Cu I по линиям излучения 510.554, 515.32, 521.82 и 570.024 nm: $T = 6700 \pm 500$ K.

Ключевые слова: плазмотрон, переменный ток, кольцевые электроды, температура.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.24.64026.9554k

Плазмотроны, широко применяемые в промышленных технологиях, способны обеспечивать высокие температуры и значительную плотность передачи энергии, что позволяет использовать их для решения различных научных и технических задач [1–5]. Исследование физических процессов, протекающих в высоковольтных электродуговых плазмотронах [6–8], играющее ключевую роль в совершенствовании их конструкций, позволит оптимизировать расход рабочих газов, снизить энергопотребление, продлить срок службы электродов и повысить стабильность работы установок. В Институте электрофизики и электроэнергетики РАН разработан и экспериментально исследован ряд конструкций плазмотронов переменного тока [9]. Их достоинствами являются простота конструкции и обслуживания, отсутствие подвижных механических элементов, использование стандартных элементов системы электропитания. Кроме того, такие плазмотроны позволяют работать с широким спектром плазмообразующих газов — как окислительных, так и восстановительных [10].

В работе приведены результаты исследования однофазного плазмотрона переменного тока с кольцевыми электродами мощностью до 10 kW [11], работающего на воздухе при атмосферном давлении в диапазонах расхода плазмообразующего газа до 3.14 g/s, детальное описание конструкции плазмотрона и иллюстрации представлены в [11]. Экспериментальная установка включала в себя однофазный плазмотрон переменного тока с кольцевыми электродами, источник электропитания, систему водяного охлаждения, систему подачи плазмообразующих газов, измерительный комплекс.

Отличительной особенностью рассматриваемой конструкции плазмотрона с кольцевыми электродами является отсутствие отдельного корпуса. Устройство представляет собой три последовательно расположенных кольцевых медных электрода, межэлектродные зазоры которых регулируются в диапазоне от 0.1 до 3 mm. Принцип действия устройства состоит в инициировании электрических дуг между соседними электродами при подаче высокого напряжения. Под воздействием тангенциально направленного потока плазмообразующего газа и электродинамических сил дуги перемещаются по внутренней поверхности электродов, деформируются и удлиняются. Затем происходит их слияние в единый протяженный плазменный столб, который занимает пространство от начального электрода до выходного сечения сопла.

В ходе экспериментов плазмотрон продемонстрировал устойчивую работу в заданном диапазоне расхода газа и надежный поджиг дуги. В работе производилась запись осциллограмм тока и напряжения электрической дуги с одновременной видеофиксацией динамики движения дуг в двух плоскостях. В первом случае главная оптическая ось камеры отклонялась от главной оси плазмотрона на 15°. Во втором случае она была перпендикулярна главной оси плазмотрона, и камера записывала струю плазмы на срезе выхода плазмотрона.

В результате были получены электрические и энергетические характеристики в широком диапазоне параметров, динамика горения дуги характеризуется соответствующими осциллограммами, приведенными на рис. 1, *a*. Зависимость вычисленного значения мощности дуги как произведения мгновенных значений тока и напряжения от расхода плазмообразующего газа (воздуха) показана на рис. 1, *b*.

Для анализа временны́х и пространственных характеристик дугового разряда с помощью скорост-

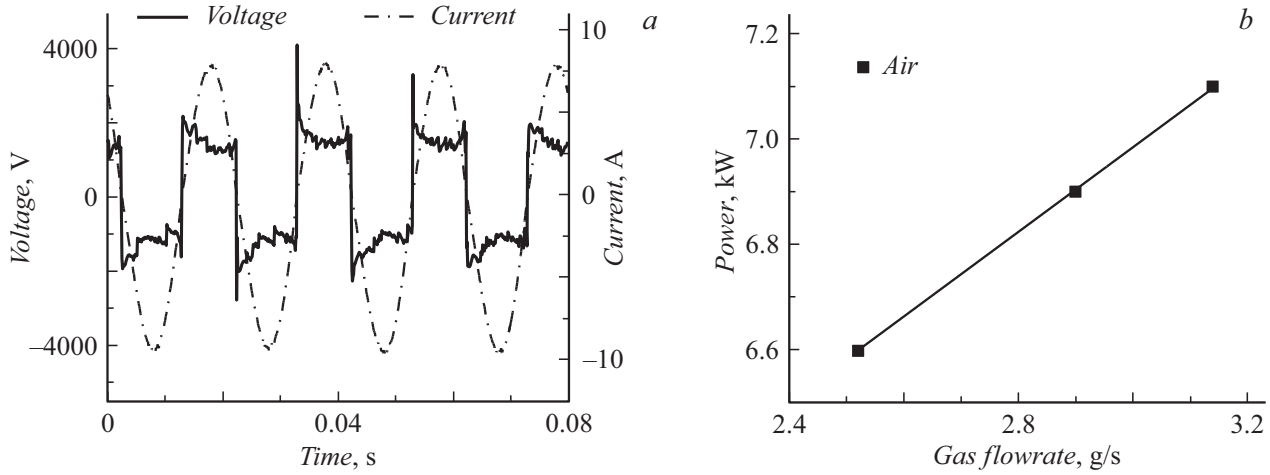


Рис. 1. Основные характеристики: *a* — осциллограммы напряжений и токов при расходе воздуха 3.14 g/s; *b* — зависимость мощности от расхода воздуха, аппроксимация выполнена линейной функцией, а среднеквадратичный разброс точек составляет 5 %.

ной видеокамеры были записаны видеофайлы. Скорость регистрации составляла 4000 fps, время экспозиции (shutter) 2 μs. Получены временны́е зависимости интенсивности излучения плазмы при фронтальном расположении (ось камеры составляла угол 15 ° с осью плазмотрона) и свободного плазменного факела (угол между осями 90 °). Проведено сравнение вычисленной по осциллограммам тока и напряжения мощности дуги с наблюдаемой интенсивностью излучения плазмы при фронтальном положении видеокамеры, с использованием дискретного преобразования Фурье получен коэффициент корреляции $K_{corr} = 0.967$. Получены покадровые изображения дуги — плазмы в двух плоскостях (рис. 2 и 3). В матрицах этих изображений выделены линии равных значений интенсивности (20 уровней) для создания контурных графиков на рис. 2 и 3.

Из рис. 2 можно видеть, что столб дуги, локализованный в центральной зоне электродуговой камеры, выдувается из сопла, находит привязку во внешней сопловой зоне плазмотрона и под действием направленного тангенциально потока плазмообразующего газа переходит последовательно от нижней части сопла к верхней. На видеофайлах наблюдается отчетливо видимое замыкание (смыкание) отдельно вышедших дуг во внешней сопловой зоне плазмотрона.

Вращение дуги наблюдается и на фронтальных снимках, приведенных на рис. 3, где привязка дуги локализована на медном электроде, что вызывает его эрозию, и вращается против часовой стрелки по направлению обдува ее газовым потоком.

Спектры излучения струи плазмы на срезе выхода плазмотрона были получены при помощи спектрофотометра Andor Shamrock 303i DV420-FK (600 lines/mm, щель 20 μm, время экспозиции 6 ms, температура фотоприемника −19 °C). В спектре присутствуют линии меди, возникающие из-за эрозии электродов: Cu I 510.554, 515.32, 521.82 и 570.024 nm. По ним построена диаграмма Больцмана и определена температура возбуждения атомов Cu I, которая составила 6700 ± 500 K, коэффициент детерминации линейной аппроксимации $R^2 \simeq 0.999$. Спектр излучения струи плазмы при расходе воздуха 2.52 g/s представлен на рис. 4.

Таким образом, проведено экспериментальное исследование рабочих параметров однофазного плазмотрона переменного тока с кольцевыми медными электродами мощностью до 10 kW при работе на воздухе и расходе плазмообразующего газа до 3.14 g/s. Установлено, что в исследованном диапазоне режимов плазмотрон обеспечивает устойчивое горение дугового разряда, при этом увеличение расхода воздуха сопровождается ростом средней электрической мощности дуги.

Совместная регистрация осциллограмм тока и напряжения и скоростная видеосъемка позволили сопоставить электрические и оптические характеристики разряда. Показана высокая степень корреляции между изменением мощности дуги и интенсивностью излучения плазмы; значение коэффициента корреляции составило $K_{corr} = 0.967$. Покадровый анализ выявил пространственную динамику дугового столба: дуга выдувается из центральной зоны плазмотрона, приобретает привязку во внешней сопловой области и под действием тангенциального газового потока перемещается по поверхности кольцевого электрода. Наблюдалось также смыкание отдельных дуг с формированием протяженного плазменного образования.

Выявлена асимметрия характеристик дугового разряда в соседних полупериодах питающего напряжения. Она обусловлена периодической сменой полярности кольцевых электродов и соответственно изменением направления зажигания дуги и протекания тока. По

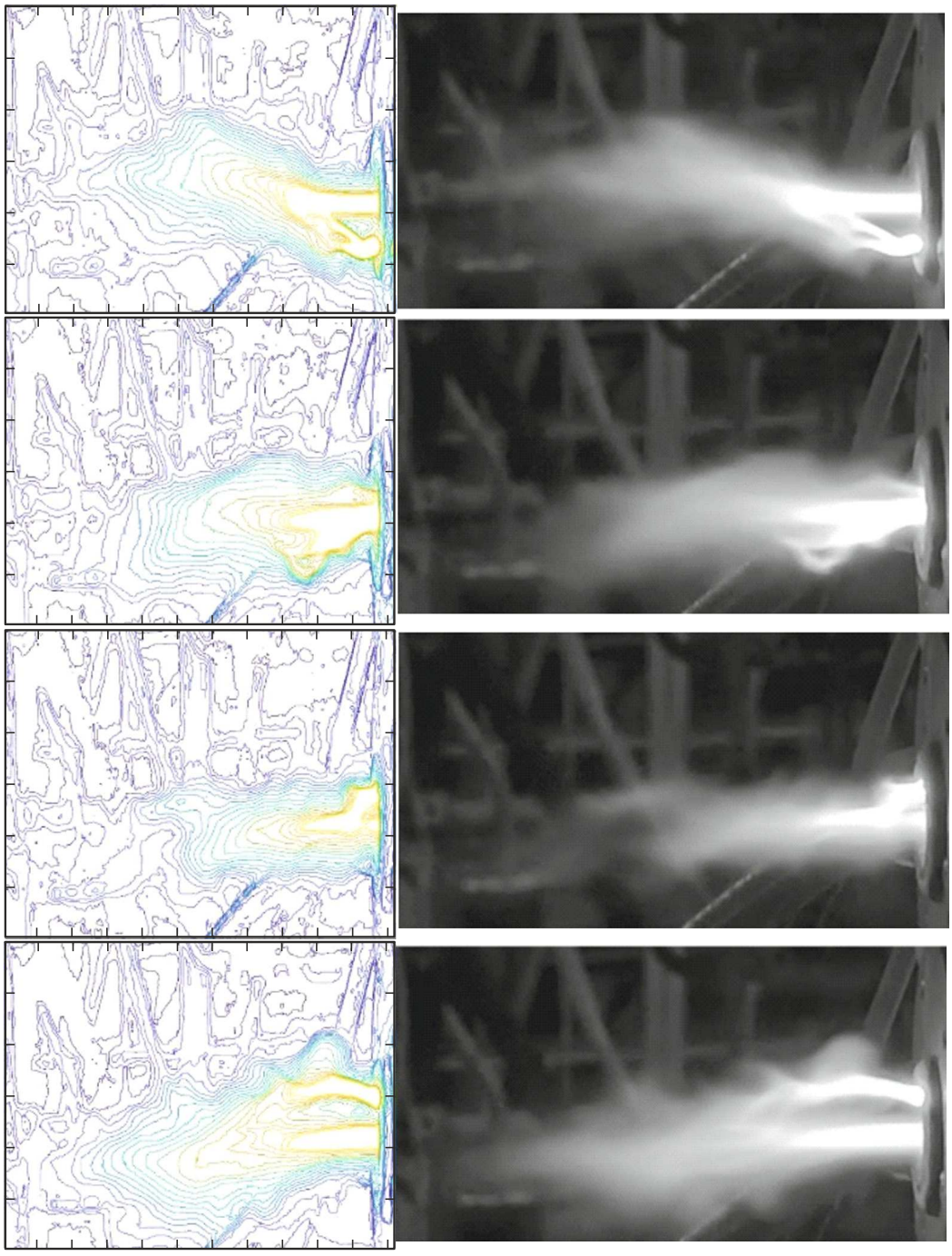


Рис. 2. Профильные изображения дугового разряда.

спектральным линиям атомарной меди Cu I 510.554, 515.32, 521.82 и 570.024 nm, появление которых связано с эрозией медных электродов, методом диаграммы Больцмана определена температура возбуждения атомов плазмы $T = 6700 \pm 500$ K. Коэффициент детерминации линейной аппроксимации составил $R^2 \simeq 0.999$.

Таким образом, сочетание электрических измерений, скоростной визуализации и оптической эмиссионной спектроскопии позволило получить взаимодополняющие данные о временно́й, пространственной и энергетической динамике дугового разряда и охарактеризовать состояние плазмы в выходной области плазмотрона.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электро-

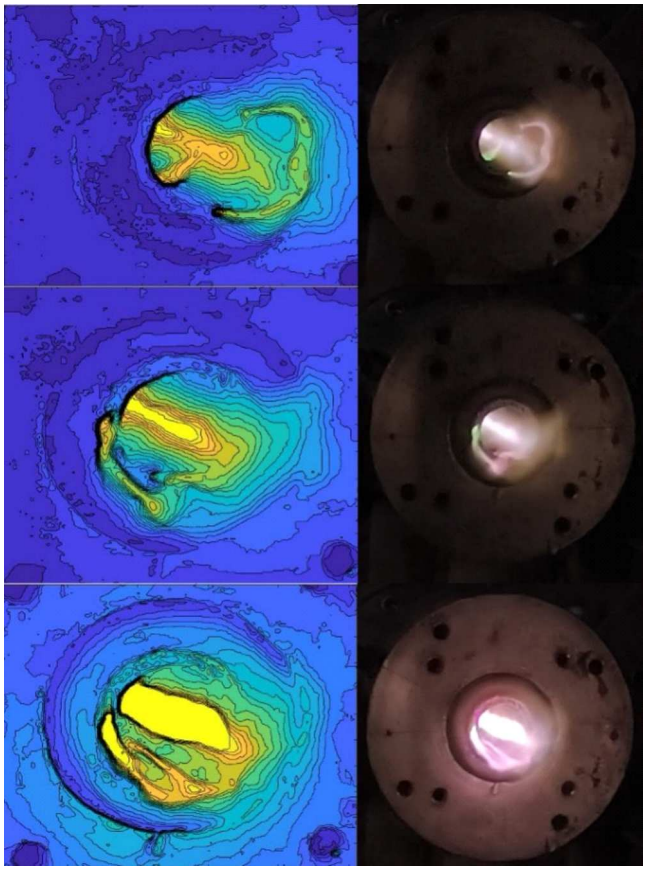


Рис. 3. Фронтальные изображения дугового разряда.

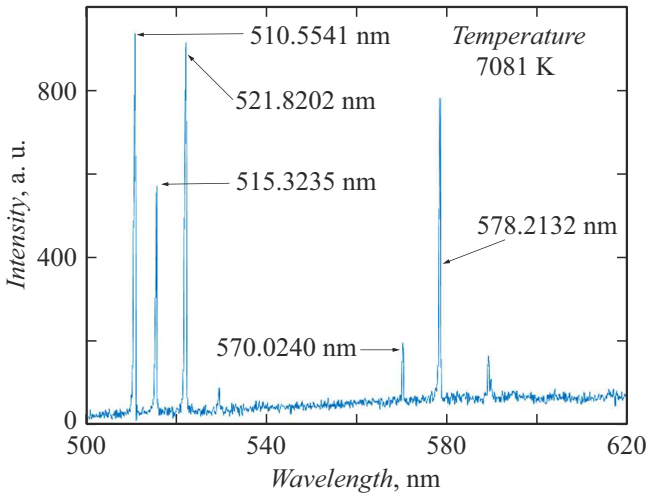


Рис. 4. Спектр излучения струи плазмы при расходе воздуха 2.52 g/s.

физики и электроэнергетики Российской академии наук (FFGR-2025-0003).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] F. Zhou, H. Ma, H. Chen, X. Zhu, X. Liu, Acta Aerodyn. Sin., **40** (5), 15 (2022). DOI: 10.7638/kqdlxxb-2021.0176
[2] А.В. Чистолинов, Р.В. Якушин, В.М. Чепелев, А.С. Тюфтяев, М.Х. Гаджиев, Письма в ЖТФ, **51** (4), 8 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.04.59834.20058 [A.V. Chistolinov, R.V. Yakushin, V.M. Chepelev, A.S. Tyuftyaev, M.Kh. Gadzhiev, Tech. Phys. Lett., **51** (2), 63 (2025). DOI: 10.61011/TPL.2025.02.60634.20058].
[3] М.Х. Гаджиев, А.С. Тюфтяев, Ю.М. Куликов, М.А. Саргсян, Д.И. Юсупов, Н.А. Демиров, Э.Е. Сон, Черная металлургия. Бюл. научно-технической экономической информации, **77** (5), 587 (2021). DOI: 10.32339/0135-5910-2021-5-587-592
[4] М.Х. Гаджиев, М.В. Ильичев, Д.И. Юсупов, А.С. Тюфтяев, Электрометаллургия, № 9, 2 (2021). DOI: 10.31044/1684-5781-2021-0-9-2-9 [M.Kh. Gadzhiev, M.V. Il'ichev, D.I. Yusupov, A.S. Tyuftyaev, Russ. Metall., **2021**, 1504 (2021). DOI: 10.1134/S0036029521120089].
[5] J. Diab, V. Rohani, L. Fulcheri, Plasma Chem. Plasma Process., **44** (2), 687 (2024). DOI: 10.1007/s11090-024-10457-9
[6] X. Cao, R. He, H. Xu, B. Huang, Y. Ma, M. Zhao, Plasma Chem. Plasma Process., **41** (4), 1169 (2021). DOI: 10.1007/s11090-021-10178-3
[7] С.Г. Ребров, А.Н. Голиков, И.А. Федоров, Прикладная физика, № 2, 103 (2023). DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-103-108
[8] В.В. Кошлаков, С.Г. Ребров, А.Н. Голиков, И.А. Федоров, Прикладная физика, № 4, 32 (2021). DOI: 10.51368/1996-0948-2021-4-32-39
[9] А.А. Сафронов, Ю.Д. Дудник, Изв. Академии электротехнических наук РФ, № 3 (25), 83 (2021).
[10] Ю.Д. Дудник, В.Е. Кузнецов, А.А. Сафронов, В.Н. Ширяев, О.Б. Васильева, Письма в ЖТФ, **50** (24), 49 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.24.59438.6514k [Yu.D. Dudnik, V.E. Kuznetsov, A.A. Safronov, V.N. Shiryaev, O.B. Vasilieva, Tech. Phys. Lett., **50** (12), 125 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.12.60372.6514k].
[11] А.А. Сафронов, Ю.Д. Дудник, М.И. Васильев, В.Н. Ширяев, О.Б. Васильева, А.В. Никонов, Г.В. Наконечный, Прикладная физика, № 1, 59 (2026). DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-59-65