

УДК 533.9.07
EDN: UKGQMA

PACS: 52.75.Hn

**Особенности динамики электрической дуги переменного тока
и ее параметры в плазмотроне с воздушным дутьем**© А. А. Сафронов, Ю. Д. Дудник*, М. И. Васильев, В. Н. Ширяев, О. Б. Васильева,
А. В. Никонов, Г. В. Наконечный

ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, 191181 Россия

*E-mail: julia_dudnik-s@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.07.2026; после доработки 31.07.2026; принята к публикации 06.08.2026

Шифр научной специальности: 1.3.13

Представлены результаты экспериментального исследования однофазного плазмотрона с кольцевыми электродами, функционирующего в диапазоне мощности до 10 кВт. Эксперименты проводились при варьировании массового расхода плазмообразующего газа (воздуха) в диапазоне до 3,2 г/с. Методика включала синхронную регистрацию осциллограмм тока и напряжения на дуговом разряде совместно с высокоскоростной видеосъемкой электрической дуги. На основании полученных данных был определен характер привязки дуги и проведен комплексный анализ ее временных и пространственных характеристик. Оценка температуры плазмы осуществлялась методом оптической эмиссионной спектроскопии по относительной интенсивности линий меди Си I. Расчеты позволили установить, что температура в зоне дугового разряда достигает значений порядка ~ 7000 К.

Ключевые слова: плазмотрон, переменный ток, воздух, температура плазмы.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-4-53-59

Введение

Интенсивное внедрение плазмотронов в современные промышленные технологии диктует необходимость углубленного изучения фундаментальных механизмов, лежащих в основе возникновения и поддержания стабильности дугового разряда. Для адекватного воспроизведения сложной пространственно-временной динамики горения дуги, что особенно критично в условиях быстро протекающих и нестационарных процессов, осуществлялась запись динамики движения дуг и их привязок с использованием современных высокоскоростных цифровых камер, обладающих высоким пространственным и временным разрешением. Этот подход позволяет получать исчерпывающие сведения о морфологии разряда, детально фиксируя мгновен-

ные трансформации его структуры и позволяя проследить траектории движения с высокой точностью. Данный метод комплексного исследования находит подтверждение в работах по изучению зоны привязки дуги к аноду [1, 2], где скоростная съемка выступает ключевым инструментом диагностики, а также в исследованиях прототипов технологических установок синтеза в открытой воздушной среде, демонстрирующих схожие подходы к фиксации электрофизических параметров [3, 4]. Методология анализа базировалась на сопоставлении данных видеорегистрации с измеренными значениями электрических характеристик дугового разряда – осциллограммами мгновенных значений токов и напряжений.

В качестве теоретической основы для анализа собранных данных применяется математический аппарат спектрального анализа,

базирующийся на преобразовании Фурье. Преобразование Фурье позволяет представить сложный сигнал в виде набора гармонических колебаний, что делает возможным идентификацию доминирующих частот. Такой подход позволяет перейти от анализа временных параметров сигнала к исследованию его частотного состава. Анализируя интенсивность излучения плазмы, возможно выявить связь между пространственно-временными изменениями яркости свечения и динамикой формирования электрической дуги.

Интеграция этих двух подходов – прямой визуализации и спектрального анализа – создает основу для разработки нового диагностического протокола. Он позволяет сопоставлять мощность дуги, вычисленную по осциллограммам тока и напряжения на дуге с ее интегральной светимостью, полученной из оптических измерений при различных геометриях видеосъемки.

Целью настоящей работы является комплексное экспериментальное исследование динамики развития дугового разряда на воздухе в плазмотроне переменного тока однокорпусного исполнения.

Экспериментальная установка и методы измерений

Исследования проводились на экспериментальной установке, схематично представленной на рисунке 1. Данная работа является продолжением многолетних исследований авторского коллектива в области проектирования и создания генераторов низкотемпературной плазмы [5]. Установка включает в себя плазмотрон переменного тока [6], источник питания, состоящий из силового трансформатора тип ОС-100/6, измерительной системы. Плазмотрон соединен с системой подачи плазмообразующего газа (смеси газов), охлаждающей жидкости и оборудован блоком регулирования и измерения их расходов. В отличие от предшествующих прототипов представленная модификация отличается оптимизированной геометрией межэлектродного промежутка и использованием схемы газодинамической стабилизации, содержащей три контура подачи газа для более эффективного удержания столба дуги.

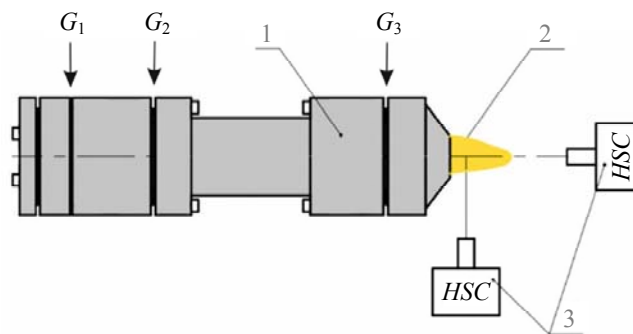


Рис. 1. Схематическое изображение плазмотрона и метода наблюдения с помощью скоростной фото- и видеосъемки: 1 – плазмотрон переменного тока; 2 – плазменный факел; 3 – высокоскоростная камера

Управление источником питания плазмотрона осуществлялось промышленным микроконтроллером Advantech, обеспечивающим мониторинг осциллограмм тока и напряжения, фиксируемых датчиками. Система подачи воздуха включала коллекторную стойку с регуляторами давления для индивидуальной настройки подачи газа в каждый контур.

Методика диагностики включала одновременную регистрацию электрических параметров (осциллограмм тока и напряжения) и оптическую диагностику динамики разряда. Запись электрических параметров дуги синхронизировалась со скоростной видеосъемкой работы плазмотрона на воздухе (зазоры электродов $D_1 = 1,9$ мм, $D_2 = 2,5$ мм) при помощи камеры Citius imaging High Speed Video Camera.

Камера позиционировалась в двух плоскостях (рис. 1): фронтально для фиксации разряда внутри камеры и перпендикулярно оси для съемки плазменного факела на срезе выхода. Съемка велась с частотой 4000 кадров/с с высоким разрешением с сохранением данных на ПК. Данный метод регистрации позволил определить место привязки дуги и провести детальный анализ временных и пространственных характеристик дугового разряда по временным зависимостям интенсивности излучения плазмы. Возможность дистанционного управления камерой обеспечила мониторинг процесса записи в реальном времени.

Экспериментально установлено, что исследуемый тип плазмотрона обеспечивает устойчивое горение дуги и бесперебойное инициирование дугового разряда в пределах заданных расходов рабочего газа. Анализ полученных данных позволил получить элек-

трические и энергетические характеристики установки в широком диапазоне режимных параметров. Динамика горения дуги характеризуется соответствующими осциллограммами [6]. Также была рассчитана мощность, вычисленная как произведение мгновенных значений тока и напряжения, которая зависела от массового расхода воздуха и возрастала равномерно прямолинейно, в диапазоне 6,6–7,1 кВт для расходов 2,5–3,2 г/с.

Результаты и обсуждения

Излучение дугового разряда в воздушной атмосфере при нормальном давлении носит преимущественно непрерывный характер, что обусловлено высокой температурой плазмы дуги (6000–10000 К) и доминированием тормозного и рекомбинационного механизмов. На этот континуум, аппроксимируемый функцией Планка, накладываются эмиссионные линии и полосы атомов и молекул, вклад которых в общую энергию излучения не превышает 30 %. Анализ энергетического баланса излучения [7, 8] показывает, что непрерывный (фоновый) спектр является доминирующим компонентом, в то время как вклад линейчатополосатого спектра оценивается в 10–30 % от общей излучаемой энергии. Распределение энергии в оптическом диапазоне при напряжении 4 кВ характеризуется преобладанием видимого излучения, на долю которого приходится до 69 % от общей энергии оптического спектра. Энергия, излучаемая в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне, составляет ~ 30 %, тогда как инфракрасное (ИК) излучение вносит незначительный вклад ~ 1 %.

Визуализация и диагностика динамики плазмы дуги осуществлялись методом высокоскоростной видеосъемки. Использовалась камера, у которой чувствительность фотоприемной матрицы находилась в спектральном диапазоне 300–1050 нм, что позволило регистрировать интенсивность излучения плазмы и отражать колебания столба дуги, гашение/перезапуск, флуктуации температуры и форму дуги. Запись велась с частотой 4000 fps, что при периоде сетевого напряжения 20 мс (50 Гц) дает разрешение по времени 250 мкс на кадр, т. е. 80 кадров за период. Эти визуальные изменения связаны с изменениями в

токе и тепловой мощности и, поэтому, можно предположить, что, в первом приближении, они отражают эволюцию энергии плазмы электрической дуги.

В ходе высокоскоростной видеосъемки процесса разряда в плазмотроне были получены видеофайлы формата .avi с разрешением 320×306 пикселей. Для анализа данных проводилась предварительная фильтрация, после которой вычислялась суммарная яркость всех пикселей в каждом кадре. Это позволило сформировать временную зависимость интенсивности свечения плазмы.

На рисунке 2 представлены полученные покадровые изображения при различных давлениях воздуха в системе: $P_1 = 0,4$ атм, $P_2 = 0,8$ атм и $P_3 = 1,0$ атм, соответствующих контурам подачи плазмообразующего газа воздуха, которые на рисунке 1 обозначены как G_1 , G_2 , G_3 . По горизонтальной оси (абсцисс) отложен номер кадра, что эквивалентно времени с шагом 250 мкс.

Как можно заметить из рисунка 2 наблюдается постепенное увеличение интенсивности излучения вплоть до 421 кадра и далее уменьшение до 436. Далее на рисунке 2 – второй полупериод (10–20 мс), во время которого наблюдается аналогичный характер зависимости интенсивности излучения. Интересно отметить характерное закручивание дуги против часовой стрелки от привязки к корпусу плазмотрона. Как видно из рисунка 2 начиная с 408 кадра и до 432 включительно привязка дуги (белая точка в низу кадра) неподвижна. Однако для второго полупериода наблюдается другой характер поведения дуги, которая достаточно интенсивно вращается, а привязка аксиально перемещается – кадры с 448 до потухания дуги на 481 кадре.

Для различия в поведении привязки электрической дуги на разных полупериодах питающего напряжения плазмотрона можно предложить следующее объяснение. Электроды кольцевидной формы, используемые в данном устройстве, характеризуются осевой симметрией. Вследствие этого, положение электродов, соответствующих аноду и катоду относительно плоскости выходного сопла меняется *vice versa* каждый полупериод. Это приводит к изменению направления зажигания дуги и, соответственно, направлению электрического тока в ней. Очевидно, направ-

ление потока воздуха остается постоянным, но в одном полупериоде этот поток совпадает с потоком электронов от катода (отрицательно-го электрода) к аноду (положительному электроду), а в другом при смене полярности противоположен. Это служит причиной в разнице поведения привязки дуги и её вращения,

наблюдаемых в различных полупериодах работы плазмотрона. Вместе с тем такая конструкция плазмотрона обладает преимуществом перед другими устройствами, поскольку обеспечивает надежное удержание дуги на поверхности кольцевых электродов, предотвращая износ кромок электродов.

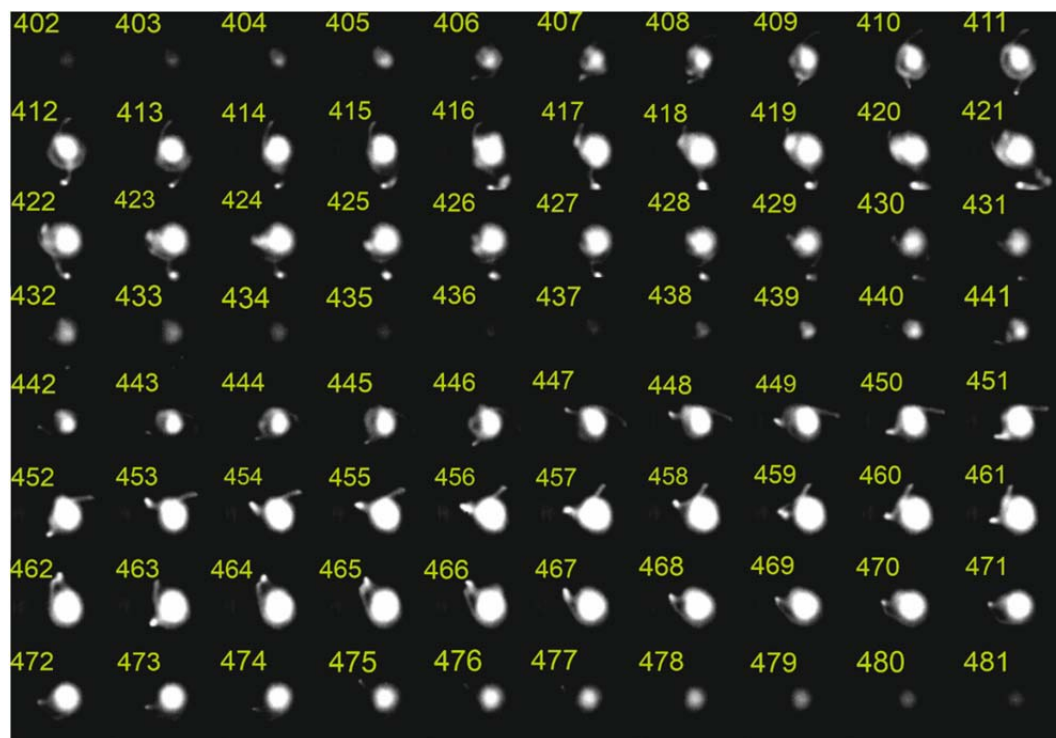


Рис. 2. Покадровые изображения плазменного факела за оба полупериода: кадры 402–441 – первый полупериод (положительный); кадры 442–481 второй полупериод (отрицательный)

На рисунке 3 представлены частотно-временные характеристики плазмы дуги, полученные по интенсивности излучения с помощью скоростной видеокамеры.

На верхней части рисунка 3 можно отметить различие в интенсивности излучения в полупериодах из-за изменения направления зажигания дуги, т. е. направления электрического тока. Соответственно, на нижней части рисунка 3 присутствует частота 50 Гц отображающая разницу полупериодов. Наличие доминирующей частоты 100 Гц подтверждает работу плазмотрона в каждом полупериоде. Все измеренные и обработанные временные сигналы показали хорошую корреляцию с электрической мощностью разряда.

Спектры излучения в диапазоне 495–630 нм струи плазмы на срезе выхода плаз-

мотрона были получены при помощи спектрофотометра Andor Shamrock 303i с использованием программного обеспечения Andor Solis. Была использована дифракционная решетка 600 штрихов/мм с длиной волны блеска 500 нм. Ширина щели составляла 20 мкм. По соотношениям интенсивностей пар линий излучения Cu I 510,554 нм переход $3d^9 4s^2 \rightarrow 3d^{10} 4p$ и 521,82 нм $3d^{10} 4p \rightarrow 3d^{10} 4d$ статистические веса $g = 4$ и $g = 6$, соответственно; 515,323 нм переход $3d^{10} 4p \rightarrow 3d^{10} 4d$ и 578,213 нм $3d^9 4s^2 \rightarrow 3d^{10} 4p$, статистические веса $g = 4$ и $g = 4$, соответственно, была определена температура плазмы дуги, которая составила ~ 7000 К. На рисунке 4 показан спектр излучения струи плазмы при расходе воздуха 2,52 г/с.

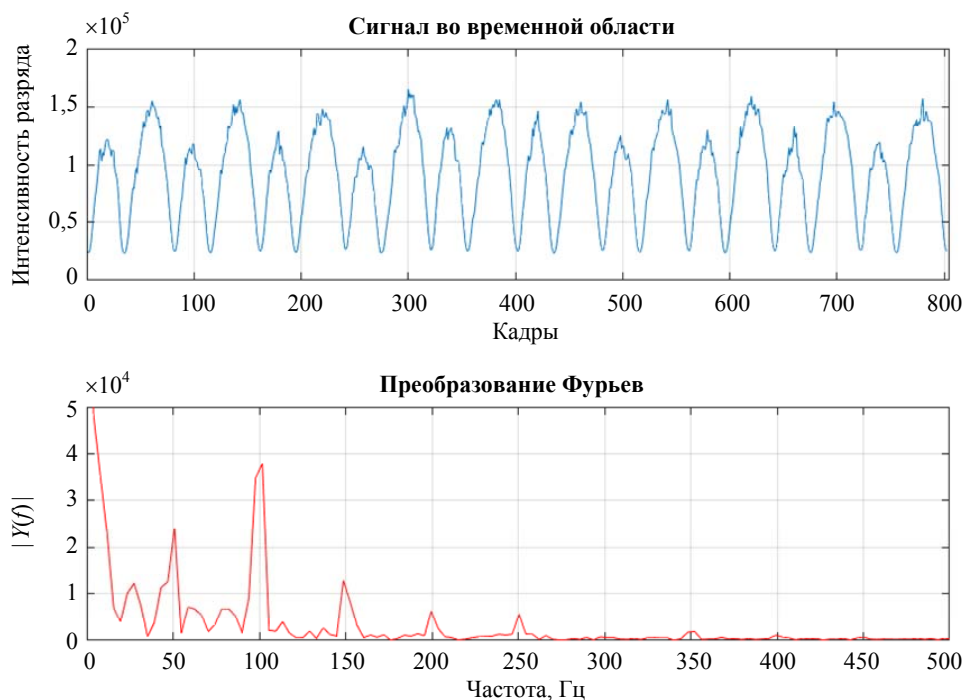


Рис. 3. Характеристики плазмы дуги: сверху – интенсивность излучения от времени за 10 полных периодов частоты 50 Гц (250 мкс на кадр); внизу – частотная характеристика

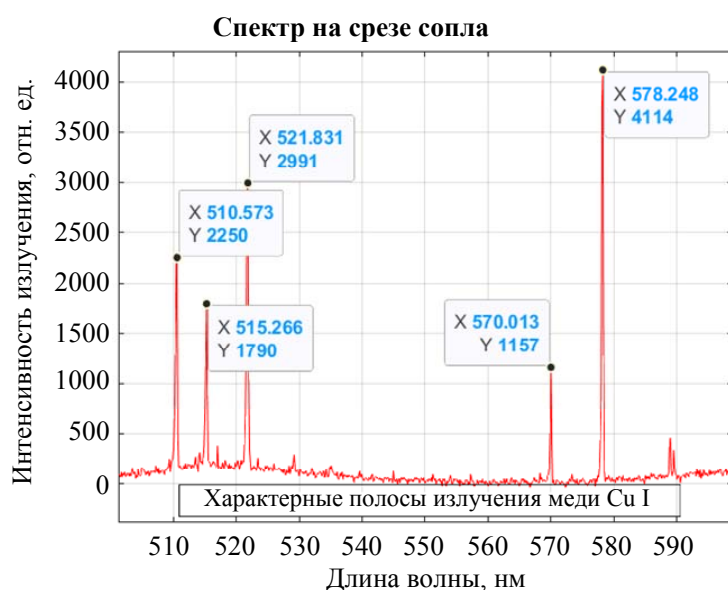


Рис. 4. Спектр излучения струи плазмы при расходе воздуха 2,52 г/с

Закключение

В работе проведено исследование процессов развития разряда в плазматроне при двух различных положениях высокоскоростной камеры. Отмечено характерное закручивание дуги против часовой стрелки от привязки к корпусу плазматрона, при этом привязка дуги неподвижна. Однако для второго полу периода наблюдается другой характер пове-

дения дуги, при котором привязка аксиально перемещается. В ходе анализа результатов измерений были рассмотрены динамические характеристики, связанные с изменениями процесса горения дуги во времени, величина мощности дуги рассчитывалась как произведения мгновенных значений тока и напряжения. Температура плазмы дуги, которая составила ~ 7000 К, была определена по спектрам излучения линий меди Cu I.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ondrac P., Maslani A., Hrabovsky M. / Plasma Physics and Technology. 2016. Vol. 3. № 1. P. 1–4.
2. Lech M., Węgierek P., Ty mińska-Wójcik P. / Energies. 2025. Vol. 18. № 21. P. 5769. <https://doi.org/10.3390/en18215769>
3. Meshcheryakov V. N., Pikalov V. V., Evseev A. M., Danilova O. V., Ambrosimov S. K. / Proceedings 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. – Lipetsk, 2019. P. 669–672.
4. Губин В. Е., Лавренчук А. А., Сперанский М. Ю., Пак А. Я. / Энергетические установки и технологии. 2022. Т. 8. № 4. С. 27–31.
5. Сафронов А. А., Кузнецов В. Е., Дудник Ю. Д., Ширяев В. Н., Васильева О. Б. / ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ 23. Сб. докл. XVIII Межд. Конф. по электро-механике и робототехнике. – Санкт-Петербург, 2023. С. 391–395.
6. Сафронов А. А., Дудник Ю. Д., Васильев М. И., Ширяев В. Н., Васильева О. Б., Никонов А. В., Наконечный Г. В. / Прикладная физика. 2026. № 1. С. 59–65.
7. Nagi Ł., Koziol M., Zygarlicki J. / Energies. 2020. Vol. 13. № 19. P. 5137.
8. Nagi Ł., Koziol M., Zygarlicki J. / Energies. 2020. Vol. 13. № 7. P. 1676.

PACS: 52.75.Hn

Features of the dynamics of an alternating current electric arc and its parameters in an air-blown plasma torch

A. A. Safronov, Yu. D. Dudnik, M. I. Vasilyev, V. N. Shiryayev, O. B. Vasilieva,
A. V. Nikonov, and G. V. Nakonechnyi

*Institute for Electrophysics and Electric Power of Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 191181 Russia
* E-mail: julia_dudnik-s@mail.ru*

Received 21.07.2026; revised 31.07.2026; accepted 06.08.2026

The paper deals with the results of an experimental study of a single-phase plasma torch with ring electrodes operating in the power range of up to 10 kW. The experiments were conducted with varying plasma gas (air) mass flow rates up to 3,2 g/s. The study methodology included synchronous recording of arc discharge current and voltage waveforms, coupled with high-speed video recording of the electric arc. Based on the obtained data, the arc attachment character was determined and a comprehensive analysis of its temporal and spatial characteristics was conducted. Plasma temperature was estimated using optical emission spectroscopy based on the relative intensity of copper Cu I lines. Calculations revealed that the temperature in the arc discharge zone reaches values of approximately 7000 K.

Keywords: plasma torch, alternating current, air, plasma temperature.

REFERENCES

1. Ondrac P., Maslani A., and Hrabovsky M., Plasma Physics and Technology **3** (1), 1–4 (2016).
2. Lech M., Węgierek P., and Ty mińska-Wójcik P., Energies **18** (21), 5769 (2025).
3. Meshcheryakov V. N., Pikalov V. V., Evseev A. M., Danilova O. V., and Ambrosimov S. K. Proceedings 2019 1st Int. Conf. on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. Lipetsk, 2019, pp. 669–672.
4. Gubin V. E., Lavrenchuk A. A., Speransky M. Yu., and Pak A. Ya., Power plants and technologies **8** (4), 27–31 (2022) [in Russian].
5. Safronov A. A., Kuzhnetsov V. E., Dudnik Yu. D., Shiryayev V. N., and Vasilieva O. B. Zavalishenskie chteniya 23. Collection of reports of the XVIII Int. Conf. on Electromechanics and Robotics. Sankt-Petersburg, 2023, pp. 391–395 [in Russian].
6. Safronov A. A., Dudnik Yu. D., Vasilyev M. I., Shiryayev V. N., Vasilieva O. B., Nikonov A. V., and Nakonechnyi G. V., Applied Physics, № 1, 49–54 (2026).
7. Nagi Ł., Koziol M., and Zygarlicki J., Energies **13** (19), 5137 (2020).
8. Nagi Ł., Koziol M., and Zygarlicki J., Energies **13** (7), 1676 (2020).

Об авторах

Сафронов Алексей Анатольевич, д.т.н., член-корреспондент РАН, заведующий отделением, ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18). E-mail: 9932553@mail.ru SPIN-код: 5771-1927, AuthorID: 37228, Scopus ID: 7101711564

Дудник Юлия Дмитриевна, к.т.н., старший научный сотрудник, ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18). E-mail: julia_dudnik-s@mail.ru SPIN-код: 7170-7912, AuthorID: 670805, ORCID ID: 0000-0002-0640-9419, Scopus ID: 5719415463

Васильев Михаил Иванович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18). E-mail: milavas@mail.ru SPIN-код: 6836-0810, AuthorID: 162131

Ширяев Василий Николаевич, старший научный сотрудник, ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18). E-mail: shiryaev_vasily@mail.ru SPIN-код: 6728-5133, AuthorID: 37225, Scopus ID: 7004970484

Васильева Ольга Борисовна, научный сотрудник, ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18). E-mail: vasilieva_olg@mail.ru SPIN-код: 7691-1515, AuthorID: 161866, ORCID ID: 0000-0003-1095-7677, Scopus ID: 56803683100

Никонов Алексей Валерьевич, научный сотрудник, ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18). E-mail: nikonav@mail.ru SPIN-код: 8215-1982, AuthorID: 161871, ORCID ID: 0000-0003-1471-2327, Scopus ID: 57193909837

Наконечный Геннадий Валерьевич, научный сотрудник, ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18). E-mail: ghennady@mail.ru SPIN-код: 6708-9658, AuthorID: 161870, Scopus ID: 57198769946