

УДК 533.9.07
EDN: PGRBLW

PACS: 52.75.Hn

Исследование электрофизических характеристик однофазного плазмотрона с кольцевыми электродами при работе на воздухе© 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 3.09.2025; после доработки 26.09.2025; принята к публикации 20.02.2026

Шифр научной специальности: 1.3.13

Приведены результаты исследования однофазного плазмотрона с кольцевыми электродами мощностью до 10 кВт. Измерения проводились с использованием медных кольцевых электродов при атмосферном давлении при расходе воздуха до 3,5 г/с. Проведено исследование развития разряда плазмотрона при двух положениях высокоскоростной камеры: первое – главная оптическая ось камеры совпадала с главной осью плазмотрона, вторая – главная оптическая ось камеры расположена перпендикулярно струе плазмы на выходе из плазмотрона. Получены временные зависимости интенсивности излучения плазмы внутри камеры и свободного плазменного факела. Проведено сравнение вычисленной по осциллограммам тока и напряжения мощности дуги с наблюдаемой интенсивностью излучения плазмы при фронтальном положении видеокамеры. Определено, что интенсивность излучения плазмы отражает эволюцию мощности дуги с коэффициентом корреляции 0,96.

Ключевые слова: плазмотрон, переменный ток, кольцевые электроды, интенсивность излучения плазмы.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-59-65

Введение

Широкое внедрение плазмотронов в промышленные технологии обуславливает необходимость углубленного изучения механизмов возникновения и поддержания стабильности дугового разряда. Стандартные методы диагностики, базирующиеся исключительно на оценке электрических характеристик, часто оказываются недостаточно информативными для адекватного воспроизведения сложной временной и пространственной динамики горения дуги, особенно в условиях быстро меняющихся процессов.

Применение новейших цифровых камер с высокими показателями разрешения и скорости записи кадров обеспечивает получение

исчерпывающих сведений о пространственно-временных особенностях разряда, данные методики позволяют детально зафиксировать мгновенные трансформации структуры дуги, проследить траектории ее движения.

Предлагаемый в данной работе аналитический подход основан на свойстве обратимости преобразования Фурье, позволяющем выявлять взаимосвязь основных частот спектрального разложения и характеристик самого сигнала. Анализируя интенсивность излучения плазмы, возникает необходимость выявления связи между пространственно-временными изменениями яркости свечения и внутренними механизмами формирования электрической дуги. Для этого удобно воспользоваться свойствами преобразования Фурье,

способного представить сигнал (например, изменение интенсивности излучения) в виде набора гармонических колебаний различной частоты. Один из ключевых выводов теории заключается в том, что если основные компоненты спектра двух функций совпадают, то сами функции достаточно близки в пределах первого приближения. Иными словами, характер изменения основного компонента спектра излучения плазмы тесно связан с особенностями развития электрического разряда.

Практически это означает, что, измеряя распределение частот в спектре интенсивности излучения плазмы, можно косвенно судить о параметрах самой электрической дуги таких, как сила тока, напряжение и температура плазмы. Таким образом, установление подобной зависимости позволит создать эффективный инструмент диагностики состояния плазматрона в процессе эксплуатации.

Целью данной работы является исследование процессов развития разряда в плазмотроне при двух различных положениях высокоскоростной камеры и проведение сравнительного анализа вычисленной по осциллограммам тока и напряжения мощности дуги с наблюдаемой интенсивностью излучения плазмы. Измерения проводились с использованием плазмообразующего газа – воз-

духа в диапазоне расходов от 0,84 г/с до 1,75 г/с при атмосферном давлении.

Экспериментальная установка и методы измерений

Экспериментальная установка включала в себя однофазный плазмотрон переменного тока с кольцевыми электродами, источник электропитания, систему водяного охлаждения, систему подачи плазмообразующих газов, измерительный комплекс.

Вид работающего плазмотрона представлен на рисунке 1. Ключевой конструктивной особенностью представленного плазмотрона является отказ от традиционного цельного корпуса, что принципиально отличает данную конструкцию от аналогичных устройств [1–3]. Однофазный плазмотрон представляет собой совокупность состыкованных электродов кольцевой формы, выполненных из меди марки М1 и М2. Для обеспечения визуального наблюдения за развитием дуги внутри плазмотрона электрод 1 оснащен смотровым окном, присоединенным к нему посредством установочного фланца. Фланец имеет отверстие для штуцера, его внутренняя конструкция создает контур для подачи плазмообразующего газа – контур 1.

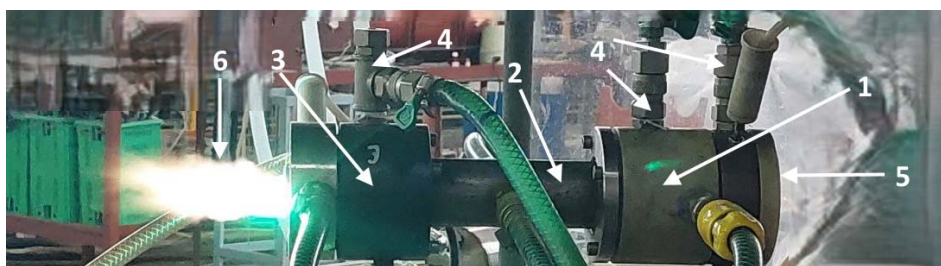


Рис. 1. Фотография работающего плазмотрона с кольцевыми электродами:
1 – электрод 1; 2 – электрод 2; 3 – электрод 3; 4 – контуры подачи газа;
5 – смотровое окно; 6 – плазменный факел

Электрод 1 и 2 соединяются между собой через изолирующий фланец с тангенциальным кольцом для подачи газа – контур 2. Подобным образом с противоположной стороны к электроду 2 крепится электрод 3, образуя еще один контур для подачи газа – контур 3. Величина межэлектродных зазоров между электродами 1 и 2 и 2 и 3 может варьироваться в диапазоне от 0,1 до 3 мм. Наружная поверхность электрода 2 оснащена приварен-

ной обечайкой с патрубками, формирующими водяную рубашку охлаждения. Герметичность конструкций обеспечивается резиновыми уплотнителями, препятствующими проникновению плазмообразующего газа и охлаждающей жидкости вовне плазмотрона.

При приложении высокого напряжения к электродам 1 и 3 плазмотрона происходит электрический пробой межэлектродных промежутков, последовательно возникающий

между электродами 1 и 2, а затем между электродами 2 и 3. Результатом становится формирование двух независимых электрических дуг.

Движение дуг обусловлено воздействием плазмообразующего газа, вводимого в контуры подачи тангенциально, а также совместным действием электродинамических и газодинамических сил. Под их влиянием точки привязки дуг начинают перемещаться по поверхности торцов электродов, вызывая постепенную деформацию и удлинение дуг, взаимно сближая их. Постепенно дуги смыкаются, сливаясь в единую электрическую дугу, простирающуюся от электрода 1 до выходного сопла плазмотрона, где точка присоединения дуги локализуется на выходной кромке сопла. Объединенная дуга продолжает свое распространение вдоль осевого направления канала плазмотрона, плавно удлиняясь и выходя из сопла, обеспечивая работу устройства.

Управление источником питания основано на применении промышленного микроконтроллера Advantech, позволяющего осуществлять мониторинг осциллограмм тока и напряжения, мгновенные значения токов и напряжений фиксируются посредством включенных в состав системы питания датчиков тока и напряжения. Система газовой подачи воздуха включала в себя коллекторную стойку с установленными на ней регуляторами давления с манометрами, обеспечивающими возможность регулировки подачи газа на каждый из контуров.

Запись осциллограмм тока и напряжения электрической дуги проводилась одновременно со скоростной видеосъемкой работы на воздухе однофазного плазмотрона с кольцевыми электродами с установленными зазорами $D_1 = 1,9$ мм и $D_2 = 2,5$ мм при помощи видеокамеры Citius imaging High Speed Video Camera, которая фиксировалась в двух положениях относительно главной оси плазмотрона. В первом случае главная оптическая ось камеры совпадала с главной осью плазмотрона, то есть происходила фронтальная фиксация разряда внутри разрядной камеры плазмотрона. Во втором случае главная оптическая ось камеры была перпендикулярна главной оси плазмотрона, и камера записывала струю плазмы на срезе выхода плазмотрона.

Были получены временные зависимости интенсивности излучения плазмы внутри ка-

меры и свободного плазменного факела. Камера производила видеосъемку с частотой 4000 кадров в секунду (fps) с высоким разрешением и была подключена к персональному компьютеру. Видеозаписи плазмы записывались в память компьютера для последующей обработки. Данный метод регистрации позволил определить характер привязки дуги и провести детальный анализ временных и пространственных характеристик дугового разряда.

Результаты и обсуждения

Электрическая дуга в воздухе при атмосферном давлении – это устойчивый электрический разряд, который сопровождается очень ярким свечением. Дуга возникает между электродами при большой силе тока и сравнительно низком напряжении [4]. Температура в столбе дуги может достигать 4000–10000 К, что создает континуум излучения, который по форме близок к спектру черного тела при подобных температурах из-за сильного тормозного (Bremsstrahlung) и рекомбинационного излучения. Можно отметить, что при атмосферном давлении спектр излучения электрической дуги близок к непрерывному, на который накладываются линейчатые (или полосатые) спектры атомов и молекул. Длина волны широкого максимума и общая форма спектра часто хорошо аппроксимируются законом Планка.

Следует отметить, что интеграл интенсивности излучения фонового спектра по всем длинам волн дает больший вклад по сравнению с линейчато-полосатым спектром, вклад от которого составляет 10–30 % общей излучаемой энергии [5, 6]. В этой же работе отмечено, что энергия ультрафиолетового излучения электрической дуги при напряжении 4 кВ, составляет всего 30 % от энергии, испускаемой в виде оптического излучения. Преобладающая доля приходится на энергию фотонов видимого света – до 69 %. Энергия инфракрасного излучения очень мала и составляет всего 1 % от общей энергии во всем спектральном диапазоне.

С учетом спектральной чувствительности видеокамеры Citius imaging, использованной в работе, которая ограничена от 300 до

1050 нм с широким максимумом на 450–750 нм, высокоскоростная съемка дает информацию об интенсивности излучения плазмы и отражает колебания столба дуги, гашение/перезапуск, флуктуации температуры и форму дуги. Эти визуальные изменения связаны с изменениями в токе и тепловой мощности и, поэтому, можно предположить, что, в первом приближении, отражают эволюцию энергии плазмы электрической дуги.

В результате проведения скоростной видеосъемки разряда плазмотрона были сняты файлы, записанные в формате «.avi». Каждый файл представлял собой последовательность отдельных кадров, сформированных светочувствительной матрицей видеокамеры Citius imaging. Таким образом файлы «.avi» отражают динамику интенсивности излучения плазмы различных режимов плазмотрона. Далее проводилась последующая обработка файлов: значения всех пикселей каждого j -го кадра суммируются, итоговая сумма записывается в j -ю позицию. Результат суммирования запи-

сывался в j -ю позицию нового вектора, длина которого соответствовала количеству кадров в файле «.avi» видеосъемки. В исследовании использовалась скорость записи 4000 кадров/с с разрешением 320×306.

В рамках проведенных исследований был выполнен ряд экспериментов с различными режимами расхода воздуха, которые представлены в таблице. Расход воздуха на каждый из контуров варьировался от 0,9 г/с до 1,75 г/с, а мощность плазмотрона изменялась в пределах до 10 кВт, общая продолжительность экспериментов не превышала 30 мин., в ходе которых плазмотрон показал устойчивую работу. Для всех проведенных экспериментов синхронно измерялась сила тока плазмотрона и напряжение на дуге с временным шагом 100 мкс.

Измеренные осциллограммы мгновенных значений тока (отмечены синим цветом) и напряжения дуги (отмечены красным цветом) для характерного режима 13 представлены на рисунке 2.

Таблица

Режимы работы плазмотрона

Номер записи	Расход G_1 , [г/с]	Расход G_2 , [г/с]	Расход G_3 , [г/с]	Суммарный расход G , [г/с]
Видеокамера перпендикулярна главной оси плазмотрона (профиль)				
1-3	0,9	1	1,75	3,65
4-6	0,9	0,84	1,75	3,49
7-9	0,9	0,74	1,75	3,39
10	0,9	0,61	1,75	3,26
Видеокамера соосна главной оси плазмотрона (фронтальный вид)				
11	0,9	0,92	1,72	3,54
12	0,9	0,84	1,72	3,46
13	0,9	0,74	1,72	3,36

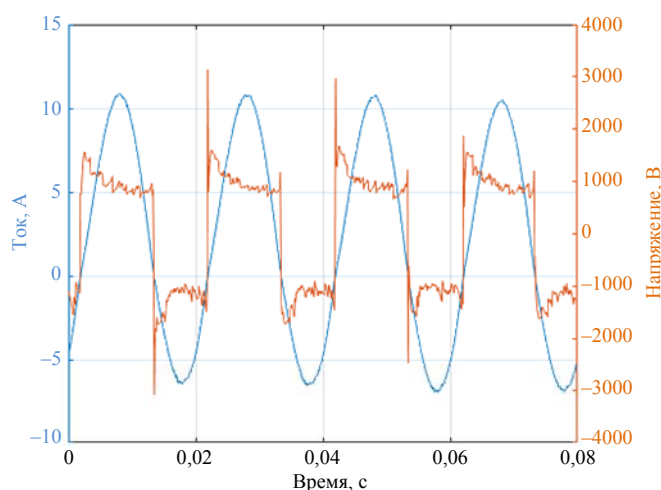


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения дуги для режима 13

Вычисленное значение мощности дуги как произведения мгновенных значений тока и напряжения показано на рисунке 3 синим цветом, а зависимость интенсивности излучения плазмы при наблюдении с фронтального расположения видеокамеры – красным цветом.

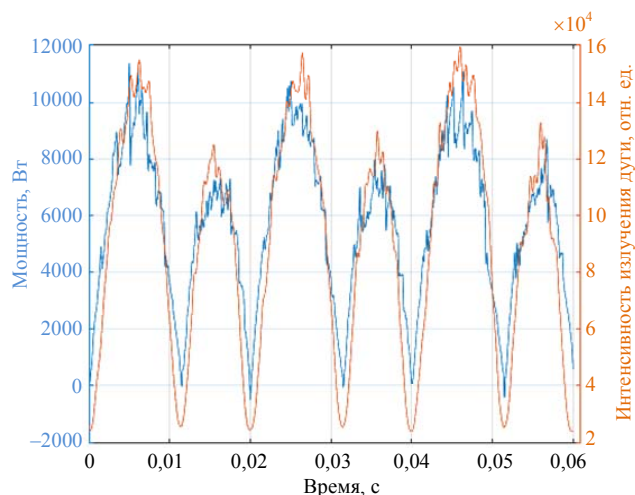


Рис. 3. Вычисленное значение мощности дуги и наблюдаемая интенсивность излучения плазмы при фронтальном положении видеокамеры

Поскольку отсчеты электрических параметров дуги выполнялись с временным шагом 100 мс, а запись видеок кадров осуществлялась с шагом 250 мс, то для вычисления коэффициента корреляции двух зависимостей на рисунке 3 была проведена унификация отсчетов при помощи интерполяции. Коэффициент корреляции между вычисленным значением мощности дуги и наблюдаемой интенсивностью излучения плазмы составил $R = 0,9612$, что подтверждает предположение о том, что измеренная скоростной видеокамерой интенсивность излучения плазмы отражает эволюцию энергии плазмы электрической дуги в хорошем приближении.

Для функции вычисленной мощности разряда (рис. 3) и функции интенсивности излучения плазмы при помощи быстрого преобразования Фурье (далее—fft) определена частотная характеристика процессов.

На рисунке 4 представлены результаты быстрого преобразования Фурье для вычисленного значения мощности дуги (верхний график) и интенсивности излучения плазмы в двух положениях видеокамеры – фронтальном (средний график) и профильном (нижний график). Для всех преобразований основная частота составила 100 Гц и очень близким соот-

ношением по амплитуде сателлитных частот, кратных основной.

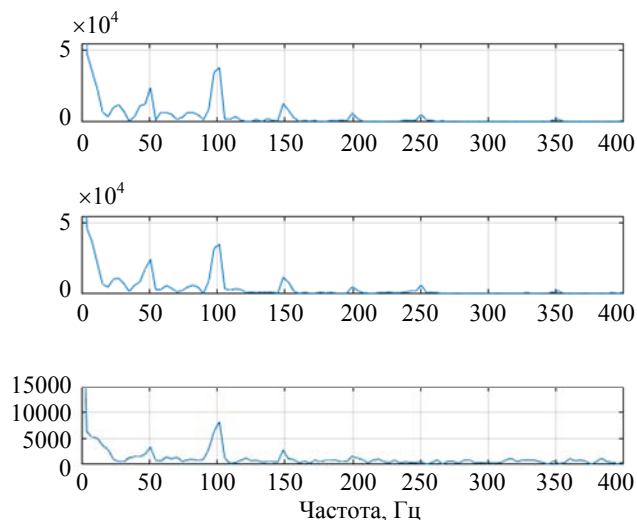


Рис. 4. Преобразование Фурье: верхний график—fft вычисленного значения мощности дуги; средний график—fft интенсивности излучения плазмы при фронтальном положении камеры (соосно главной оси плазмотрона) и нижний график—fft интенсивности излучения плазмы, когда камера перпендикулярна струе плазмы на выходе из плазмотрона

Из использования свойства обратимости преобразования Фурье следует, что совпадение по основным частотам преобразования Фурье функций влечет близость, в первом приближении, самих функций. Таким образом и при подобном рассмотрении можно предположить, что интенсивность излучения плазмы хорошо коррелирует с мощностью разряда электрической дуги.

Заключение

В работе проведено исследование процессов развития разряда в плазмотроне при двух различных положениях высокоскоростной камеры и проведено сравнение вычисленной по осциллограммам тока и напряжения мощности дуги с наблюдаемой интенсивностью излучения плазмы. 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.

Сравнение вычисленного значения мощности электрической дуги и наблюдаемой ин-

тенсивности излучения плазмы подтверждает предположение о том, что измеренная скоростной видеокамерой интенсивность излучения плазмы отражает эволюцию энергии плазмы электрической дуги в хорошем приближении, при этом коэффициент корреляции составляет $\sim 0,9612$.

Дополнительное подтверждение возможности использования интенсивности излучения плазмы для анализа мощности электрической дуги плазматрона основано на свойстве обратимости преобразования Фурье, из которого следует, что совпадение по основным частотам преобразования Фурье функций влечет близость, в первом приближении, самих функций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафронов А. А., Ковшечников В. Б., Васильева О. Б., Дудник Ю. Д., Кузнецов В. Е., Ширяев В. Н. / Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57. № 6. С. 846–851.
2. Сафронов А. А., Кузнецов В. Е., Васильева О. Б., Дудник Ю. Д., Ширяев В. Н. / Приборы и техника эксперимента. 2019. № 2. С. 58–66.
3. Сафронов А. А., Кузнецов В. Е., Дудник Ю. Д., Ширяев В. Н., Васильева О. Б. / Завалишинские чтения 23. Сб. докл. XVIII Межд. Конф. по электромеханике и робототехнике. – Санкт-Петербург, 2023. С. 391–395.
4. Lee T. H., Kam D. H., Oh J. H., Kim Ch. / JMR&T. 2022. Vol. 19. P. 685–696.
5. Nagi L., Koziol M., Zygarlicki J. / Energies. 2020. Vol. 13. № 19. P. 5137.
6. Nagi L., Koziol M., Zygarlicki J. / Energies. 2020. Vol. 13. № 7. P. 1676.

PACS: 52.75.Hn

Study of the dynamics of arc discharge burning in a methane-hydrogen-containing atmosphere in an alternating current plasma torch

A. A. Safronov, Yu. D. Dudnik*, M. I. Vasilyev, V. N. Shiryaev, 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 3.09.2025; revised 26.09.2025; accepted 20.02.2026

The paper deals with the results of a study of a single-phase plasma torch with ring electrodes with a power of up to 10 kW. The measurements were carried out using copper ring electrodes at atmospheric pressure with an air flowrate of up to 3.5 g/s. A study of the plasma torch discharge development was carried out at two positions of the high-speed chamber: the first – the main optical axis of the chamber coincided with the main axis of the plasma torch, the second – the main optical axis of the chamber is located perpendicular to the plasma jet at the exit from the plasma torch. Time dependences of the plasma radiation intensity inside the chamber and a free plasma torch were obtained. A comparison was made of the arc power calculated from the oscillograms of current and voltage with the observed plasma radiation intensity at the frontal position of the video camera. It was determined that the plasma radiation intensity reflects the evolution of the arc power with a correlation coefficient of ~ 0.96 .

Keywords: plasma torch, alternating current, arc discharge, high-speed video recording, correlation between plasma radiation intensity and arc power.

REFERENCES

1. Safronov A. A., Kovshechnikov V. B., Vasilieva O. B., Dudnik Y. D., Kuznetsov V. E., and Shiryaev V. N., High Temperature **57**(6), 808–812 (2019).
2. Safronov A. A., Kuzhnetsov V. E., Vasilieva O. B., Dudnik Yu. D., and Shiryaev V. N., Instruments and Experimental Techniques **62** (2), 193–200 (2019).

3. Safronov A. A., Kuzhnetsov V. E., Dudnik Yu. D., Shiryaev 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].
4. Lee T. H., Kam D. H., Oh J. H., and Kim Ch., JMR&T **19**, 685–696 (2022).
5. Nagi Ł., Koziół M., and Zygarlicki J., Energies **13** (19), 5137 (2020).
6. Nagi Ł., Koziół 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, 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., 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