

УДК 533.9.07
EDN: QHEIAV

PACS: 52.75.Hn

Исследование динамики горения дугового разряда в метан-водородосодержащей атмосфере в плазмотроне переменного тока

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

ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, 191186 Россия

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

Статья поступила в редакцию 19.12.2024; после доработки 24.01.2025; принята к публикации 7.04.2025

Шифр научной специальности: 1.3.13

Приведены результаты исследования динамики горения дугового разряда в электродуговой камере плазмотрона переменного тока мощностью до 10 кВт. Измерения проводились с использованием графитовых и вольфрамовых электродных наконечников при атмосферном давлении в диапазонах расходов плазмообразующих газов: H_2 до 0,08 г/с и смеси H_2+CH_4 до 0,1 г/с. Установлены характерные стадии развития разряда, среди которых наблюдались контрагированные, диффузные с образованием плазменного шлейфа и переходные типы дугового разряда.

Ключевые слова: плазмотрон; переменный ток; дуговой разряд; скоростная видеорегистрация.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-2-69-75

Введение

Изучение режимов горения дуговой плазмы представляет собой одну из важнейших задач современной физики низкотемпературной плазмы. В силу уникальных свойств, таких как высокая температура и плотность энергии, дуговые разряды находят широкое применение в различных областях науки и техники, включая металлургию, сварочные технологии, технологии нанесения покрытий, плазмохимию, технологии получения порошковых материалов и др. Несмотря на наличие ряда работ [1–5], посвященных исследованию дуговой плазмы, некоторые аспекты её поведения остаются недостаточно изученными.

Плазмотроны, активно используемые в промышленных процессах, требуют глубокого понимания механизмов формирования и устойчивого существования дугового разряда. Традиционные методы диагностики, основанные на измерении электрических параметров, зачастую недостаточны для полного описания

динамической картины горения дуги, особенно в условиях быстрых временных и пространственных изменений. Скоростная фото- и видеосъемка является эффективным средством визуализации и анализа процессов горения дуг в разрядной камере. Данный метод позволяет регистрировать мгновенные изменения в структуре дуги, отслеживать её движение и деформацию, а также выявлять ключевые механизмы взаимодействия плазмы с окружающими поверхностями. Применение современных цифровых камер с высоким разрешением и частотой кадров дает возможность проводить детальный анализ временных и пространственных характеристик дугового разряда, что критически важно для понимания и оптимизации работы плазмотронов.

Благодаря способности генерировать высокоэнтальпийные газовые потоки, плазмотроны при проведении плазмохимического синтеза обеспечивают интенсификацию химических процессов в газовой фазе с резким уменьшением зоны реакции, размера техно-

гического оборудования и увеличения выхода полезного продукта.

Электрическая дуга, возникающая между электродами в камере плазмотрона, создаёт условия для формирования высокотемпературной плазмы. К основным параметрам, влияющим на динамику горения дуги, можно отнести температуру, плотность тока, давление газа и состав плазмообразующей среды. Динамика горения дуги влияет на равномерность распределения температуры и концентрации активных частиц в объеме плазмы. Неоднородности в распределении этих параметров могут привести к неравномерному протеканию химических реакций и, как следствие, к снижению выхода целевых продуктов. Поэтому оптимизация этих параметров позволяет достичь максимальной эффективности плазмохимических процессов и увеличить выход полезных продуктов.

Целью данной работы является исследование процессов формирования и развития дугового разряда посредством методов фоторегистрации и видеорегистрации. Это позволит установить временные и пространственные характеристики дугового разряда, такие как форма и размеры дугового канала, интенсивность излучения, и др. Измерения проводились с использованием графитовых и вольфрамовых электродных наконечников при атмосферном давлении в диапазонах расходов плазмообразующих газов: H_2 до 0,08 г/с и смеси H_2+CH_4 до 0,1 г/с. Проведен анализ режимов работы плазмотрона, описаны режимы горения дуг.

Экспериментальная установка и методы измерений

Исследования проводились на экспериментальной установке, схематично представленной на рисунке 1, включающей в себя плазмотрон переменного тока [6, 7], источник электропитания, систему охлаждения и подачи плазмообразующих газов, а также комплекс измерительных приборов.

Плазмотрон включает в себя два корпуса, изготовленных из нержавеющей стали 12X18H10T. Каждый корпус содержит водоохлаждаемый электродный блок со сменными выходными вставками из графита. Электрод-

ный блок состоит из водоохлаждаемого корпуса и электрода с наконечником, закрепленного на его конце. Наконечник может быть выполнен из различных материалов, таких как вольфрам, графит или медь. В корпусе имеется канал для тангенциальной подачи плазмообразующего газа, который формирует спиралевидный газовихревой поток, охлаждающий и стабилизирующий дуговой канал. На сопловом блоке закреплен фланец, образующий пространство между корпусом и внутренней стенкой для подачи охлаждающей воды, обеспечивающей отвод тепла от зоны зажигания дуги. Электродные каналы располагаются соосно и соединяются с электродуговой камерой, которая может выполнять функцию реакционной камеры, служащей плазмохимическим реактором при введении обрабатываемого материала.

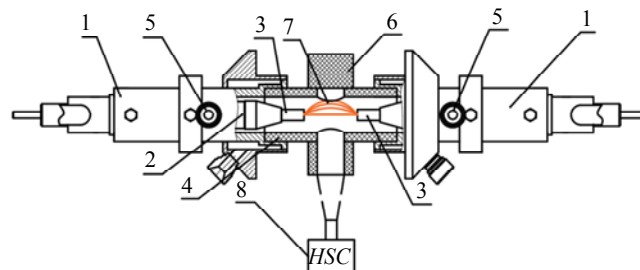


Рис. 1. Схематическое изображение плазмотрона и метода наблюдения с помощью скоростной фото- и видеосъемки: 1 – корпус; 2 – электрод; 3 – наконечник; 4 – втулка; 5 – подача газа; 6 – камера электродуговая; 7 – дуга; 8 – высокоскоростная камера

При подаче высокого напряжения между электродом и внутренней стенкой канала происходит электрический пробой межэлектродного зазора, приводящий к образованию дуги. Под действием тангенциальной подачи газового потока в каналы дуги перемещаются к концам электродов, затем продвигаясь по графитовой вставке, выдуваются на ее торец и переключаются с электродом из противоположного канала. Таким образом, дуга распространяется от конца одного электрода к концу другого. При смене полярности подобная картина повторяется на другом электроде. Формирование вихревого потока газа в каналах способствует эффективному отведению избыточного тепла от центральной части дуги,

предотвращая развитие температурных градиентов и связанных с ними неустойчивостей плазменного канала.

Необходимо подчеркнуть, что в плазмотроне данного типа возможно реализовать смешивание плазмообразующих газов без необходимости остановки и дополнительной переналадки устройства. Данная особенность позволяет выполнять различные эксперименты, значительно сокращая временные и материальные затраты. Запуск устройства для обеспечения гарантированного поджига производился на аргоне с расходом до 0,5 г/с, при выходе на стационарный режим подавался водород в рабочем диапазоне расходов, а подача аргона прекращалась, в дальнейшем применение балластных газов для поддержания горения разряда не осуществлялось.

Скоростная съемка проводилась с помощью видеокамеры Citius imaging High Speed Video Camera, расположенной перпендикулярно оси плазмотрона. Камера способна производить съемку с частотой до 4000 кадров в секунду (fps) с высоким разрешением. Наличие необходимых интерфейсов позволяет подключить камеру к персональному компьютеру, что предоставляет возможность дистанционного управления настройками съемки и обеспечить мониторинг процесса записи в реальном времени. Данный метод регистрации позволил определить место привязки дуги и провести детальный анализ временных и пространственных характеристик дугового разряда.

Результаты и обсуждения

В рамках проведенных исследований был выполнен ряд экспериментов с использованием фото- и видеосъемки. Расход водорода варьировался до 0,08 г/с, расход метана до 0,02 г/с, а мощность плазмотрона изменялась в пределах до 10 кВт, общая продолжительность эксперимента не превышала 30 минут.

В ходе анализа результатов измерений рассматривались как статические характеристики, отражающие усредненные во времени соотношения изменяющихся параметров, так и динамические характеристики, связанные с изменениями процесса горения дуги во времени. Динамика горения дуги была зафикси-

рована на соответствующих осциллограммах: изменение тока во времени изменялось синусоидально, а кривая напряжения демонстрировала отчетливые пики зажигания и погасания при переходе через нуль.

Общая длительность полупериода изменения напряжения на осциллограмме может быть разделена на три части. Первая и третья часть представляют собой боковые стороны трапеции – это стадии нарастания и спада напряжения на межэлектродном зазоре, когда дуговой разряд ещё не образовался или уже прекратил своё существование. Средняя часть, которую можно назвать «основанием» трапеции, характеризуется колебаниями напряжения вокруг среднего значения и соответствует времени существования дугового разряда. При этом в некоторых полупериодах отмечается незначительное увеличение напряжения ближе к середине данного интервала. Величина амплитуды колебаний пикового напряжения варьируется в зависимости от типа газа и находится в пределах от 1,2 до 4 кВ.

Результатом скоростной видеосъемки разряда в электродуговой камере плазмотрона являлись файлы в формате .avi, которые отражают динамику различных режимов исследованного дугового разряда. Для устранения помех на кадрах, которые присутствовали в виде постоянно светящихся около электродных областей, была применена фильтрация файлов .avi. Среди всех кадров файла находилась такой, у которого интегральная светимость кадра была минимальной, то есть, когда очевидно разряд отсутствовал. Далее из матрицы каждого кадра файла вычиталась матрица кадра с минимальной светимостью. В результате получался новый файл .avi с минимальными помехами. Новые приведенные файлы обрабатывались следующим образом. Вычислялась сумма всех пикселей матрицы с разрешением [320×306] очередного j -го кадра. Результат суммирования записывался в j -ю позицию нового вектора, длина которого соответствовала количеству кадров в файле .avi видеосъемки. Таким образом вычислялась зависимость относительной интенсивности светимости от времени для всех исследованных разрядов. Можно предположить, что относительная интенсивность светимости хорошо коррелирует с вычисленной мощ-

ностью тока разряда. Используя полученный вектор относительной интенсивности светимости исследуемого разряда, при помощи преобразования Фурье «fft» определялась частотная характеристика процесса. Для всех видов разряда основная частота составила 100 Гц с незначительными сателлитами частот, кратных основной.

На рисунках приведены последовательные кадры из видеофайлов, зарегистрированных скоростной камерой Citius со скоростью видеосъемки 4000 кадров в секунду и экспозицией 10 мкс нормально к плоскости разряда. На кадрах виден наконечник электрода, с которого во время наложения импульса тока вырывается и уносится потоком плазмы его материал (вольфрам и графит). Выбор кадров

осуществлялся следующим образом: по ранее полученному вектору относительной интенсивности светимости выбирались последовательно идущие кадры, начиная с минимальной величины светимости разряда, то есть с начала разряда вплоть до достижения максимума интенсивности светимости и далее кадры с уменьшающейся интенсивностью светимости разряда до погасания данного периода разряда. На рисунке 2 в правой вставке приведен пример для переходного разряда, где точками на кривой интенсивности разряда отмечены выбранные номера кадров видеофайла, начиная с номера 235. Аналогичный выбор кадров из соответствующих видеофайлов других разрядов был сделан и для рисунков 3 и 4.

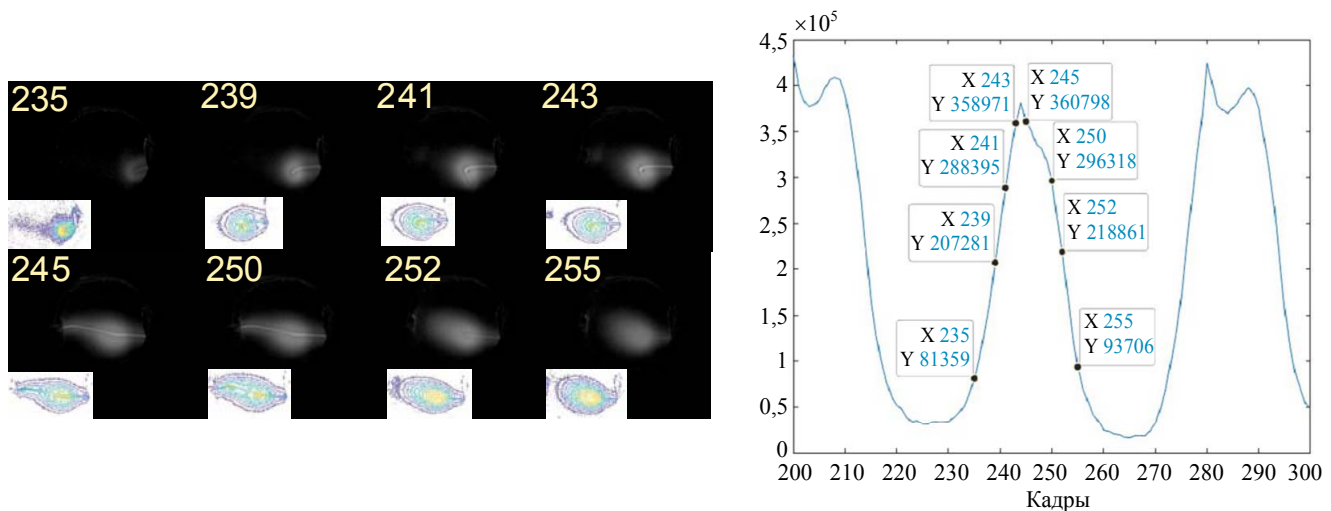


Рис. 2. Режим переходного разряда с картиной распределения интенсивности излучения в зависимости от номера кадра, расход водорода H_2 0,06 г/с, ток 6 А, мощность 6 кВт

На рисунке 2 представлена картина развития переходного разряда с первоначальным образованием плазменного облака вблизи электрода, на котором загорается (формируется) дуга, не достигая противоположного электрода, загибается (вытягивается) на торец электрода и под действием потока плазмообразующего газа выдувается в направлении противоположного электрода. После достижения максимальных значений интенсивности (кадры 245 и 250) дуга движется назад к электроду, на котором она зажглась. Отметим, что на всех стадиях наблюдается плазменное облако вокруг кончика дуги. Диаметр плазменного облака достигает 25–30 мм. Данный режим наблюдается при расходе плазмообразующего

газа водорода до 0,06 г/с, при непродолжительном нагреве электродуговой камеры в течение нескольких минут и после выхода на стабильный режим можно наблюдать показанную динамику горения дуги, а также при смеси водород метан в соотношении 6:1 в течение первых минут работы.

Контрагированный разряд представлен на рисунке 3. Он характерен для расхода водорода 0,04–0,08 г/с и наблюдается при «холодной» камере. Практически сразу формируется ярко выраженная дуга, в которой давление собственного магнитного поля превышает газокинетическое, за счет чего наблюдается контракция. По мере развития разряда наблюдается увеличение поперечного сечения дуги. Это, по-

видимому, зависит от изменения в соотношении давлений собственного магнитного поля и газокинетического в сторону последнего. Этим же можно объяснить и постепенное искривление дуги под действием выдуваемого рабочего газа.

Отметим, что как зарождение дуги (кадр 145), так и погасание в данном рассматриваемом полупериоде (кадр 180) исходили из правого электрода. В следующем полупериоде с переменной полярности на электродах дуга зажигается на левом электроде (кадр 186). При этом слабый участок дуги заметен и в области противоположного электрода. Между этими участками не наблюдалось излучения от дуги. Скорее всего порог светочувствительности приемника видеокамеры ниже светимости дуги на этом участке и её недостаточно для регистрации. Можно предположить, что при использовании более чувствительной, цветной матрицы фотоприемника мы могли бы рассмотреть по отдельности R, G и B матрицы этого кадра и, возможно, увидеть этот участок более детально.

На рисунке 4 представлена картина развития разряда, называемого в зарубежной

научной литературе plasma plume [8, 9], то есть плазменный шлейф (плазменное облако). Газопылевые плазменные облака часто наблюдались на экспериментах с дуговыми разрядами на графитовых электродах, постепенное расширение от кадра к кадру плазменного шлейфа в полупространство вплоть до середины межэлектродного расстояния, что составляло ~ 30 мм. После достижения максимальной светимости разряда, что соответствует максимальной мощности (кадры 241 и 244), происходит обратный процесс сокращения плазменного облака вплоть до полного погасания. Следует отметить наличие области повышенной яркости в около электродном пространстве, которая напоминает формирующуюся дугу, однако, как видно из линий равной интенсивности хоть как-то выраженной дуги не наблюдается. Наличие плазменного облака удалось зарегистрировать только при смешивании двух видов плазмообразующего газа метана и водорода в соотношении 1:8, 1:6, 1:3. Основной газ – водород изменялся в диапазоне 0,06 г/с до 0,08 г/с, затем к нему подмешивался метан с расходом 0,01 г/с.

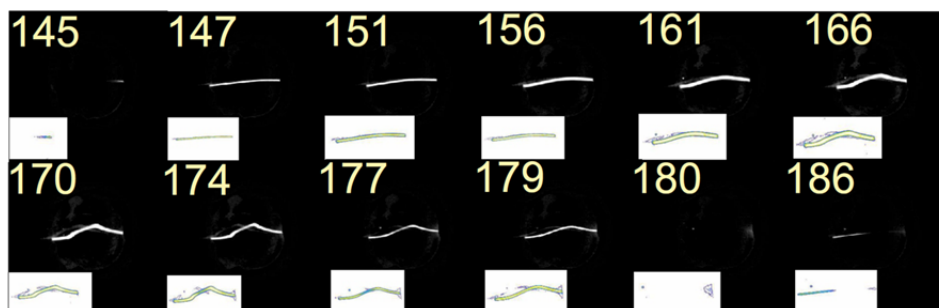


Рис. 3. Режим контрагированного разряда, расход водорода H_2 0,06 г/с, ток 6 А, мощность 6 кВт

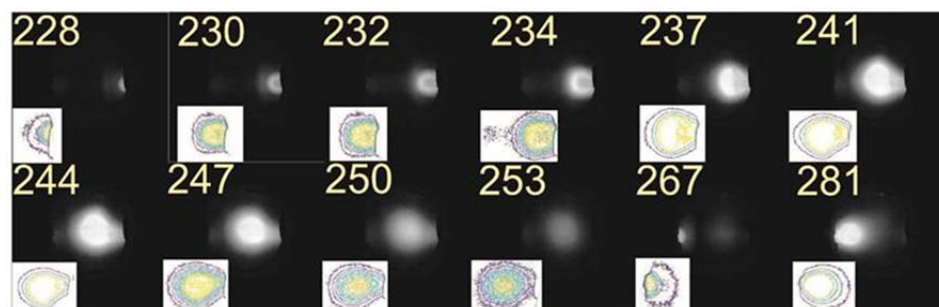


Рис. 4. Режим диффузного (плазменный шлейф) разряда, расход смеси водород H_2 0,08 г/с и метан CH_4 0,01 г/с, ток 6 А, мощность 7 кВт

Учитывая, что в ходе экспериментов в схему установки не вносились изменения, то переход от промежуточного (переходного) разряда с первоначальным образованием плазменного облака вблизи электрода к контрагированному и далее к плазменному шлейфу (плазменному облаку), то различный характер разряда можно объяснить степенью ионизации рабочих газов, используемых в эксперименте, и различным давлением.

Заключение

В работе рассмотрены особенности динамики горения дугового разряда при атмосферном давлении в диапазонах расходов плазмообразующих газов: H_2 до 0,08 г/с и смеси H_2+CH_4 до 0,1 г/с в плазмотроне переменного тока. Установлены характерные стадии развития разряда, среди которых наблюдались контрагированные, диффузные с образованием плазменного шлейфа и переходные типы разряда. Контрагированный разряд характерен для расхода водорода 0,04–0,08 г/с с формированием ярко выраженного тела дуги. Переходный режим разряда был зарегистрирован при расходе плазмообразующего газа – водорода при расходе до 0,06 г/с и на смеси водорода и метана в соотношении 6:1, наблюдается наличие плазменного облака

с диаметром 25–30 мм, образованного вокруг тела дуги. Режим диффузного разряда с наличием газопылевого плазменного шлейфа имел место в режимах смеси метана и водорода в соотношениях 1:8, 1:6, 1:3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. – М.: Издательство иностранной литературы, 1961.
2. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. – М.: МФТИ, 2009.
3. Герман В. О., Глинов А. П., Головин А. П., Козлов П. В., Любимов Г. А. / Прикладная физика. 2012. № 6. С. 108–115.
4. Степанов Е. Ю., Долиновская Р. В., Шабалин С. А. / Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. № 3–2 (154). С. 110–114.
5. Verameychyk A. I., Onysko S. R., Sazonov M. I., Khvisevich V. M. / Vestnik of Brest State Technical University. 2021. № 3 (126) P. 79–81.
6. Кузнецов В. Е., Дудник Ю. Д., Сафронов А. А., Ширяев В. Н., Васильева О. Б., Гаврилова Д. А., Гаврилова М. А. / Проблемы термоядерной энергетики и плазменные технологии. Материалы III Межд конф. – Таруса. 2023. С. 67–68.
7. Дудник Ю. Д., Кузнецов В. Е., Сафронов А. А., Ширяев В. Н., Васильева О. Б. / Физика СПб – Санкт-Петербург. 2024. С. 273–275.
8. Pickin C., Young K. / Sci Technol Weld Join. 2006. Vol 11. № 4. P. 1–3.
9. Bartkowiak K., Vasilyev M. / 3rd Pacific Intern. Conf. on Applications of Lasers and Optics, PICALO 2008. Conf. Proc. 2008. P. 267–272.

PACS: 52.75.Hn

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

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

*Institute for Electrophysics and Electric Power of Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 191186 Russia*

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

Received 19.12.2024; revised 24.01.2025; accepted 7.04.2025

The paper presents the results of a study of the arc discharge burning dynamics in the electric arc chamber of an alternating current plasma torch with a power of up to 10 kW. The measurements were carried out using graphite and tungsten electrode tips at atmospheric pressure in the ranges of plasma-forming gas flow rates: H_2 up to 0.08 g/s and a mixture of H_2+CH_4

upto 0.1 g/s. Characteristic stages of the discharge development were obtained, among which contracted, diffuse with the formation of a plasma plume and transient types of the discharge.

Keywords: plasma torch; alternating current; arc discharge; high-speed video recording.

REFERENCES

1. Finkelnburg W. and Maecker H., Elektrische Bögen und Thermisches. Plasma Handbuch der Physik Berlin **22** (1956); Moscow, Inostrannaya literature, 1961.
2. Raizer Yu. P., Physics of gas discharge. Moscow, MFTI, 2009 [in Russian].
3. German V. O., Glinov A. P., Golovin A. P., Kozlov P. V. and Lyubimov G. A., Applied Physics, № 6, 108–115 (2021) [in Russian].
4. Stepanov E. Yu., Dolinovskaya R. V. and Shabalin S. A., Scientific and Technical Journal of St. Petersburg State Polytechnic University, № 3–2 (154), 110–114 (2012) [in Russian].
5. Verameychyk A. I., Onysko S. R., Sazonov M. I. and Khvisevich V. M., Vestnik of Brest State Technical University, № 3 (126), 79–81 (2021).
6. Kuznetsov V. E., Dudnik Yu. D., Safronov A. A., Shiryaev V. N., Vasilieva O. B., Gavrilova D. A. and Gavrilova M. A., Problems of thermonuclear energy and plasma technologies. Proc. of the III Intern. Conf. Tarusa, 2023. pp. 67–68.
7. Dudnik Yu. D., Kuznetsov V. E., Safronov A. A., Shiryaev V. N. and Vasilyeva O. B., Physics St. Petersburg – St. Petersburg, 2024, pp. 273–275 [in Russian].
8. Pickin C. and Young K., Sci Technol Weld Join. **11** (4), 1–3 (2006).
9. Bartkowiak K. and Vasilyev M., 3rd Pacific Intern. Conf. on Applications of Lasers and Optics, PICALO 2008. Conf. Proc. 2008, pp. 267–272.

Об авторах

Дудник Юлия Дмитриевна, научный сотрудник, ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191186, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18). E-mail: julia_dudnik-s@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 7170-7912, Author ID 670805

Сафронов Алексей Анатольевич, заведующий отделением, главный научный сотрудник, д.т.н., ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191186, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18). E-mail: 9932553@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 5771-1927, Author ID 37228

Ширяев Василий Николаевич, старший научный сотрудник, ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191186, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18). E-mail: shiryaev_vasily@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 6728-5133, Author ID 37225

Васильев Михаил Иванович, научный сотрудник, ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191186, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18). E-mail: milavas@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 6836-0810, Author ID 162131

Васильева Ольга Борисовна, научный сотрудник, ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191186, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18). E-mail: vasilieva_olg@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 7691-1515, Author ID 161866