

Исследование эрозии электродов в плазмотронах постоянного и переменного тока

В. Е. Кузнецов, А. А. Сафронов, В. Н. Ширяев, О. Б. Васильева, Ю. Д. Дудник

Работа посвящена исследованию износостойкости (эрозии) материала электродов в плазмотронах постоянного и переменного тока. Ресурс работы электродов определяется многими факторами, такими как состав материала электрода, конструкция электродуговой камеры, температура тела электрода, температура в зоне привязки электрической дуги и способ ее перемещения, характер химических реакций между плазмообразующим газом и материалом электрода. При этом основными факторами, влияющими на эрозионный унос материала, является величина тока в дуге, характер привязки к электроду (катодное или анодное пятно), а также организация газового потока в зоне пятна. При проведении экспериментов использовались плазмотроны постоянного и переменного тока мощностью до 50 кВт, для изготовления электродов использовались медь, нержавеющая сталь и композитный материал состава железо–медь. В работе приведены характерные значения и зависимости величин удельной эрозии плазмотронов различных конструкций в широком диапазоне рабочих параметров.

Ключевые слова: плазмотрон постоянного тока, плазмотрон переменного тока, электроды, эрозия.

Ссылка: Кузнецов В. Е., Сафронов А. А., Ширяев В. Н., Васильева О. В., Дудник Ю. Д. // Прикладная физика. 2019. № 3. С. 24.

Reference: V. E. Kuznetsov, A. A. Safronov, V. N. Shiryayev, O. B. Vasilieva, and Yu. D. Dudnik, Prikl. Fiz., No. 3, 24 (2019).

Введение

Одним из основных вопросов, определяющих высокую надежность и удобство эксплуатации плазмотронов в составе электрофизических установок различного назначения [1–3], является создание конструкции электрода. Вне зависимости от того, какой тип

плазмотрона будет использоваться в работе, его долговечность напрямую зависит от срока службы электродной системы.

Традиционное решение, применяющееся в настоящее время, заключается в оптимизации конструкции электрода, электродуговой камеры плазмотрона, а также в подборе или создании наиболее подходящего материала для изготовления электродов [4–7].

Так как величина эрозии электродов зависит от мощности плазмотрона, от скорости перемещения точки привязки электрической дуги и ряда других параметров, то создание благоприятных условий для направленного перемещения опорных точек электрической дуги должно привести к снижению времени теплового воздействия, улучшению распределения тепловой нагрузки по поверхности электродов и, соответственно, к снижению эрозии [8].

Кузнецов Владимир Евгеньевич, зав. лаб.
Сафронов Алексей Анатольевич, зав. лаб.
Ширяев Василий Николаевич, с.н.с.
Васильева Ольга Борисовна, н.с.
Дудник Юлия Дмитриевна, м.н.с.
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18.
Тел.: 8(812) 571-53-83, 8(812) 315-17-57.
E-mail: julia_dudnik-s@mail.ru, rc@iperas.nw.ru

Статья поступила в редакцию 20.03.2019 г.

© Кузнецов В. Е., Сафронов А. А., Ширяев В. Н.,
Васильева О. Б., Дудник Ю. Д., 2019

Целью работы является исследование параметров эрозии плазмотронов постоянного и переменного тока. В ходе работы ставилась задача исследовать возможность использования разных типов материалов для электродных блоков, а также получения зависимостей удельной эрозии от величины тока и других характеристик в широком диапазоне рабочих параметров.

Типы плазмотронов переменного и постоянного тока

Ниже представлены конструкции плазмотронов переменного и постоянного тока, которые использовались для проведения экспериментов. Конструкция плазмотрона переменного тока со стержневыми электродами представлена на рис. 1. Плазмотрон [17–19] состоит из корпуса, выполненного из нержавеющей стали, в котором расположены два сходящихся цилиндрических канала с электродами, оканчивающихся коническим выходным соплом. В каждом канале имеются тангенциальные отверстия для подачи газа. Стержневые электроды выполнены в виде тела вращения и имеют общую ось с каналом, в ко-

тором устанавливается. Электрод состоит из изолятора и съемного конусного наконечника и изолируется от корпуса керамической вставкой, которая рассчитана на максимальное напряжение 17 кВ при температуре конструкции электрода 200 °С [9], что позволяет работать без водяного охлаждения. Выходное сопло, крепящееся к корпусу плазмотрона, может быть керамическим или металлическим.

Плазмотрон постоянного тока, представленный на рис. 2 [10], состоит из водоохлаждаемого корпуса, выполненного из нержавеющей стали с кольцевой рубашкой охлаждения и внутренними каналами, соединенными со штуцерами для подвода и отвода воды, клеммой 2 (анод) для подключения основного питания. В водоохлаждаемом корпусе расположен водоохлаждаемый электрод 3 (катод) со штуцерами для подвода и отвода воды, электрическим быстросъемным разъемом, наконечником, изоляционными втулками. Между электродом 3 и корпусом через изоляционные втулки и установлен поджигающий электрод с дополнительным кольцевым электродом, с соплом. Между электродом 7 и втулкой образуется зазор А, а между электродом 7 и соплом – зазор Б.

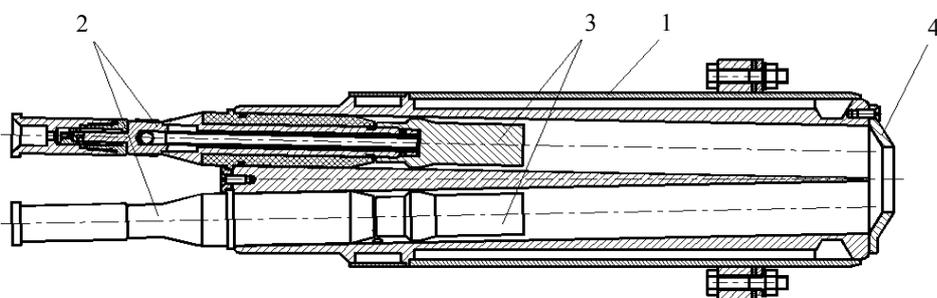


Рис. 1. Плазмотрон переменного тока: 1 – корпус; 2 – электроды; 3 – наконечники электродов; 4 – сопло.

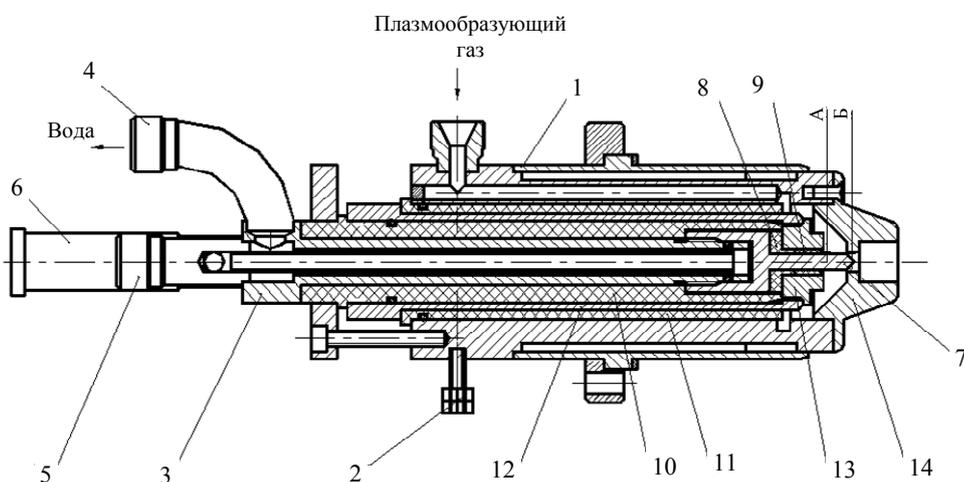


Рис. 2. Плазмотрон постоянного тока: 1 – водоохлаждаемый корпус; 2 – анод; 3 – катод; 4, 5 – каналы со штуцерами; 6 – электрический быстросъемный разъем; 7 – наконечник; 8–11 – изоляционные втулки; 12 – поджигающий электрод; 13 – разрядное кольцо; 14 – сопло.

Плазмотрон подключен к системе водяного охлаждения с давлением 6 атм., системе подачи плазмообразующего газа (воздуха), системе питания, к импульсному устройству поджига основной дуги.

Для проведения экспериментов электроды плазмотронов изготавливались из следующих материалов: медь, нержавеющая сталь и, впервые, для изготовления катода в представленной конструкции плазмотрона постоянного тока использовался композитный материал состава железо–медь, который хорошо зарекомендовал себя ранее в плазмотронах переменного тока [11–13] при работе на воздухе.

Результаты и обсуждения

Исходя из проведенных исследований, было установлено, что при работе плазмотрона материалы электродов подвергаются как электрической, так и химической эрозии. В качестве плазмообразующего газа, подаваемого в камеру плазмотрона во время его работы, могут выступать практически любые газы и их смеси. Условно, рабочие газы плазмохимических процессов можно разделить на: окислительные (CO_2 , H_2O , Cl_2 , HCl , воздух и др.) и неокислительные (N_2 , He , Ar , NH_3 и др.). Соответственно, факторы, негативно влияющие на материал электрода, различны при использовании этих газовых сред.

Если электрод, испытывающий электродинамическое воздействие, влияние температурных, механических напряжений, мощных тепловых и газовых потоков, оказывается в атмосфере обладающей окислительными

свойствами, процесс эрозии может приобрести катастрофический характер для ряда материалов, широко используемых при изготовлении электродов.

Анализ механизма работы материалов электродов в условиях повышенной температуры показывает, что ресурс работы может быть увеличен за счет введения определенных добавок (железо, тугоплавкие соединения и др.), снижающих интенсивность испарения меди в процессе создания плазмы. Однако введение тугоплавких добавок имеет свои недостатки, в частности, приводит к снижению тепло- и электропроводности материалов и, следовательно, не дает возможности создавать установки требуемой мощности, производительности и ресурса работы.

Для определения возможности использования материала для изготовления электродов различных материалов были выполнены эксперименты по определению удельной эрозии ряда образцов.

В таблице содержатся показатели величины удельной эрозии для различных материалов, применявшихся при изготовлении электродов для плазмотрона переменного тока, где представлены лучшие показатели для различных материалов в сравнении с результатами, полученными при использовании электротехнической меди.

Для электродов плазмотронов переменного тока состава железо–медь была проведена серия экспериментов различной продолжительности, причем максимально до 108 часов. Зависимость удельной эрозии от времени эксперимента приведена на рис. 3.

Таблица

Показатели величины удельной эрозии для различных материалов

Материал	Ток, А	Величина удельной эрозия, г/Кл
медь	2,8	$5,8 \times 10^{-4}$
Сталь 45X25H35C2	2,6	$7,1 \times 10^{-6}$
	4,4	$7,1 \times 10^{-6}$
	7,7	$15,7 \times 10^{-6}$
	7,0	$4,0 \times 10^{-6}$
70%Cu + 30%Fe	7,2	$7,4 \times 10^{-6}$

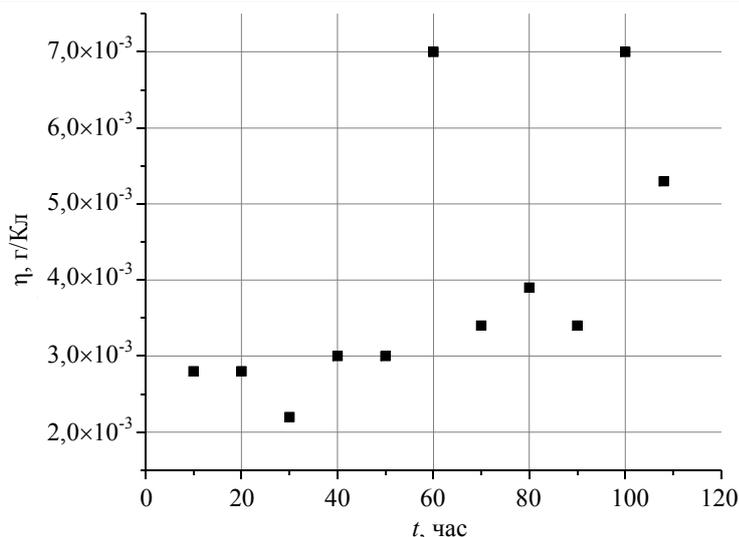


Рис. 3. Зависимость величины удельной эрозии η от времени t эксперимента для электродов состава железо–медь (70%Cu + 30%Fe), рабочий газ – воздух.

По результатам проведенных экспериментов выявилась особенность образцов из стали 45X25H35C2, а именно, они продемонстрировали достаточно хорошие эрозионные свойства, хотя и уступающие материалам состава железо–медь.

Также были опробованы каркасные карбидные композиционные материалы, содержащие медь [14–16]. Каркасная структура (два взаимопроникающих каркаса – карбидный и металлический) и уникальный комплекс свойств – физико-механических, теплофизических, электрофизических – с достаточно высокой вероятностью позволяют предположить хорошую эрозионную стойкость этих мате-

риалов в электрической дуге на воздухе. Тугоплавкий, стойкий к окислению карбидный каркас удерживает в порах медь при температурах выше точки плавления последней, сохраняя, таким образом, работоспособность материала. Данный материал очень хорошо показал себя при проведении экспериментов. Удалось получить значения удельной эрозии $\eta \approx 10^{-6}$ г/Кл в диапазоне рабочих токов от 2 до 10 А.

Для плазмотрона постоянного тока были выполнены эксперименты по определению уровня удельной эрозии медных электродов для различного значения токов. Результаты приведены на рис. 4.

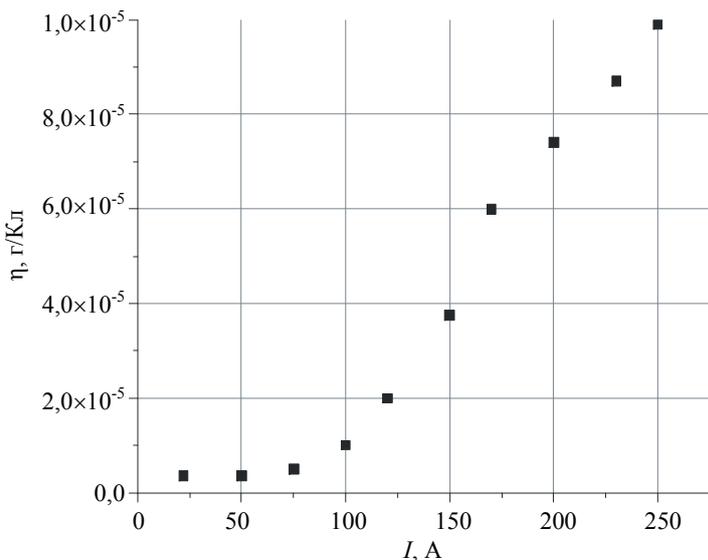


Рис. 4. Зависимость величины удельной эрозии η медных электродов от тока I , рабочий газ – воздух.

Заключение

Как показали результаты выполненных экспериментов, для определенной конструк-

ции плазмотрона не удается добиться значительного изменения величины удельной эрозии путем простого изменения конфигурации

электродов. Это связано с тем, что, как правило, конструкция плазмотрона изначально сбалансирована и возможность кардинального изменения конфигурации отдельного элемента просто отсутствует. А вот подбор материала, наиболее полно удовлетворяющего требованиям эксплуатации плазмотрона (мощность, периодичность включения, состав рабочего газа), наоборот, может оказать заметное влияние на характер и величину эрозионного износа. В частности, для композита Fe-Cu максимальное значение эрозии достигало величины $(2 \div 4) \times 10^{-3}$ г/Кл после 100 часов работы.

Можно отметить, что для малых токов (до 30 А) и при использовании воздуха в качестве рабочего плазмообразующего газа эрозия материала электродов для плазмотрона постоянного тока заметно меньше, чем для плазмотрона переменного тока, и составляет $\sim 10^{-6}$ г/Кл. Скорее всего, это связано с тем, что при изменении полярности происходит повторное зажигание дуги, что может являться причиной механического разрушения поверхностного слоя материала. Для постоянного тока, когда перекоммутация полярности питания не происходит, процесс горения дуги развивается в условиях теплообмена, близких к стационарным. При увеличении силы тока и при преодолении некоторой, для каждого материала электрода своей, величины воспринимаемого теплового потока в механизме разрушения и электродов плазмотрона постоянного тока начинают играть существенную роль процессы, не связанные напрямую с эрозией. Например, когда часть жидкой фазы материала электрода уносится газовым потоком в виде капли расплава, т. е. фактор механического разрушения получает существенное значение. И в этом случае перекоммутация полярности играет уже положительную роль. Поэтому при увеличении силы тока износ материала электродов плазмотронов переменного тока становится существенно меньше, чем электродов, работающих при постоянном токе.

Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН № 31 «Фундаментальные исследования физико-технических проблем энергетики» по направлению «Фундаментальные аспекты

новых плазменных технологий производства водорода из органического сырья для водородной энергетики».

ЛИТЕРАТУРА

1. Safronov A. A., Vasilieva O. B., Dudnik J. D., Kuznetsov V. E., Shiryayev V. N., Subbotin D. I., Pavlov A. V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. Vol. 825. No. 1. P. 012013.
2. Vasilieva O. B., Kumkova I. I., Kuznetsov V. E., Rutberg A. P., Safronov A. A., Shiryayev V. N. // High Temp. 2015. Vol. 53. No. 4. P. 470.
3. Kuznetsov V. E., Safronov A. A., Vasilieva O. B., Shiryayev V. N., Dudnik Y. D., Pavlov A. V., Kuchina Yu. A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 946. No. 1. P. 012166.
4. Виноградов С. Е., Рыбин В. В., Рутберг Ф. Г., Сафронов А. А., Шекалов В. И., Ширяев В. Н., Кузнецов В. Е. // Вопросы материаловедения. 2002. № 2 (30). С. 52.
5. Dudnik Yu. D., Borovskoy A. M., Shiryayev V. N., Safronov A. A., Kuznetsov V. E., Vasilieva O. B., Pavlov A. V., Ivanov D. V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 946. No. 1. P. 012167.
6. Kuchina J. A., Kuznetsov V. E., Subbotin D. I., Popov V. E., Serba E. O., Dudnik J. D., Litvyakova A. I., Cherepkova I. A., Surov A. V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. Vol. 929. P. 012096.
7. Budin A. V., Pinchuk M. E., Kuznetsov V. E., Leont'ev V. V., Kurakina N. K. // Instruments and Experimental Techniques. 2018. Vol. 60. No. 6. P. 837.
8. Subbotin D. I., Kuznetsov V. E., Litvyakova A. I., Cherepkova I. A., Surov A. V., Nakonechnyi G. V., Spodobin V. A. // Technical Physics. 2017. Vol. 62. No. 11. P. 1639.
9. Kuznetsov V. E., Popov S. D., Spodobin V. A., Ovchinnikov R. V., Dudnik Yu. D., Vasilieva O. B. / 12 Int. Conf. "GAS DISCHARGE PLASMAS AND THEIR APPLICATIONS". Tomsk. 2015. P. 108.
10. Кузнецов В. Е., Сафронов А. А., Васильева О. Б., Дудник Ю. Д., Ширяев В. Н. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 38.
11. Кузнецов В. Е., Киселев А. А., Овчинников Р. В., Дудник Ю. Д. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2012. № 2 (146). С. 100.
12. Субботин Д. И., Кузнецов В. Е., Литвякова А. И., Черепкова И. А., Суров А. В., Наконечный Г. В., Сподобин В. А. // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 11. С. 1637.
13. Кузнецов В. Е., Овчинников Р. В., Сподобин В. А., Ширяев В. Н., Никонов А. В., Лукьянов С. А., Васильева О. Б. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2007. Т. 50. № 9-2. С. 206.
14. Kuznetsov V. E., Popov S. D., Spodobin V. A., Ovchinnikov R. V., Dudnik Ju. D., Vasilieva O. B. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 9-2. С. 17.
15. Safronov A. A., Vasilieva O. B., Dudnik Yu. D., Kuznetsov V. E., Shiryayev V. N. В книге: «Современные проблемы теплофизики и энергетики». Материалы Международной конференции в 2-х томах. 2017. С. 251–252.

16. Subbotin D. I., Surov A. V., Kuznetsov V. E., Popov V. E., Dudnik Ju. D., Kuchina Yu. A., Obratsov N. V. // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1038. P. 012131.

17. Сафронов А. А., Ширяев В. Н., Кузнецов В. Е. Патент на полезную модель RUS 187848, 26.11.2018.

18. Бланк Е. Д., Виноградов С. Е., Кузнецов В. Е., Орыщенко А. С., Рутберг Ф. Г., Рыбин В. В., Слепнев В. Н., Сафронов А. А., Шекалов В. И., Ширяев В. Н. Патент на изобретение RUS 2381590. 31.10.2008.

19. Виноградов С. Е., Кузнецов В. Е., Рутберг Ф. Г., Рыбин В. В., Сафронов А. А., Шекалов В. И., Ширяев В. Н. Патент на изобретение RUS 2301474. 29.04.2005.

PACS: 52.75.Hn

Investigation of the parameters of electrode erosion in direct and alternating current plasma torches

V. E. Kuznetsov, A. A. Safronov, V. N. Shiryayev, O. B. Vasilieva, and Yu. D. Dudnik

Institute for Electrophysics and Electric Power of Russian Academy of Sciences
18 Dvortsovaya nab., St. Petersburg, 191186, Russia
E-mail: julia_dudnik-s@mail.ru, rc@iperas.nw.ru

Received March 20, 2019

The paper deals with the study of the wear resistance (erosion) of the material of the electrodes in direct and alternating current plasma torches. The life time of the electrodes is determined by many factors, such as the composition of the electrode material, the design of the electric arc chamber, the electrode body temperature, the temperature in the arc attachment zone and the method of its movement, the nature of chemical reactions between the plasma gas and the electrode material. At the same time, the main factors affecting the erosion of the material, is the amount of current in the arc, the nature of attachment to the electrode (cathode or anode spot), as well as the organization of the gas flow in the spot area. In experiments, the AC and DC plasma torches with power of up to 50 kW were used. Electrodes were made of copper, stainless steel, and an iron-copper composite material. The paper presents the characteristic values and dependences of the values of specific erosion of plasma torches of various designs in a wide range of operating parameters.

Keywords: DC plasma torch, AC plasma torch, electrodes, erosion.

REFERENCES

1. A. A. Safronov, O. B. Vasilieva, J. D. Dudnik, V. E. Kuznetsov, V. N. Shiryayev, D. I. Subbotin, and A. V. Pavlov, J. Phys.: Conf. Ser. **825** (1), 012013 (2017).
2. O. B. Vasilieva, I. I. Kumkova, V. E. Kuznetsov, A. P. Rutberg, A. A. Safronov, and V. N. Shiryayev, High Temp. **53** (4), 470 (2015).
3. V. E. Kuznetsov, A. A. Safronov, O. B. Vasilieva, V. N. Shiryayev, Y. D. Dudnik, A. V. Pavlov, and Yu. A. Kuchina, J. Phys.: Conf. Ser. **946** (1), 012166 (2018).
4. S. E. Vinogradov, V. V. Rybin, Ph. G. Rutberg, A. A. Safronov, V. I. Shekalov, V. N. Shiryayev, and V. E. Kuznetsov, Voprosy materialovedeniya, No. 2 (30), 52 (2002).
5. Yu. D. Dudnik, A. M. Borovskoy, V. N. Shiryayev, A. A. Safronov, V. E. Kuznetsov, O. B. Vasilieva, A. V. Pavlov, and D. V. Ivanov, J. Phys.: Conf. Ser. **946** (1), 012167 (2018).
6. J. A. Kuchina, V. E. Kuznetsov, D. I. Subbotin, V. E. Popov, E. O. Serba, J. D. Dudnik, A. I. Litvyakova, I. A. Cherepkova, and A. V. Surov, J. Phys.: Conf. Ser. **929**, 012096 (2017).

7. A. V. Budin, M. E. Pinchuk, V. E. Kuznetsov, V. V. Leont'ev, and N. K. Kurakina, *Instruments and Experimental Techniques* **60** (6), 837 (2018).
8. D. I. Subbotin, V. E. Kuznetsov, A. I. Litvyakova, I. A. Cherepkova, A. V. Surov, G. V. Nakonechnyi, and V. A. Spodobin, *Technical Physics* **62** (11), 1639 (2017).
9. V. E. Kuznetsov, S. D. Popov, V. A. Spodobin, R. V. Ovchinnikov, Yu. D. Dudnik, and O. B. Vasilieva, in *Proc. 12 Int. Conf. "Gas Discharge Plasmas and Their Applications"* (Tomsk, 2015). P. 108.
10. V. E. Kuznetsov, A. A. Safronov, O. B. Vasilieva, Yu. D. Dudnik, and V. N. Shiryaev, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 38 (2018).
11. V. E. Kuznetsov, A. A. Kiselev, R. V. Ovchinnikov, and Yu. D. Dudnik, *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskkiye nauki*. 2012. No. 2 (146). P. 100.
12. D. I. Subbotin, V. E. Kuznetsov, A. I. Litvyakova, A. V. Surov, G. V. Nakonechnyi, I. A. Cherepkova, and V. A. Spodobin, *Tech. Phys.* **62** (11), 1639 (2017).
13. V. E. Kuznetsov, R. V. Ovchinnikov, V. A. Spodobin, V. N. Shiryaev, A. V. Nikonov, S. A. Luk'yanov, and O. B. Vasilieva, *Russian Physics Journal* **50** (9-2), 206 (2007).
14. V. E. Kuznetsov, S. D. Popov, V. A. Spodobin, R. V. Ovchinnikov, Ju. D. Dudnik, and O. B. Vasilieva, *Russian Physics Journal* **58** (9-2), 17 (2015).
15. A. A. Safronov, O. B. Vasilieva, Yu. D. Dudnik, V. E. Kuznetsov, and V. N. Shiryaev, in *Book: Modern problems of thermal physics and energetics*. (Proceedings of International Conference, 2017). P. 251–252.
16. D. I. Subbotin, A. V. Surov, V. E. Kuznetsov, V. E. Popov, Ju. D. Dudnik, Yu. A. Kuchina, and N. V. Obratsov, *Journal of Physics: Conference Series*. **1038**, 012131 (2018).
17. A. A. Safronov, V. N. Shiryaev, and V. E. Kuznetsov, Patent RUS 187848. November 26, 2018.
18. E. D. Blank, S. E. Vinogradov, V. E. Kuznetsov, A. S. Orichenko, P. G. Rutberg, V. V. Rybin, V. N. Slepnev, A. A. Safronov, V. I. Shekalov, and V. N. Shiryaev, Patent RUS 2381590. October 31, 2008.
19. S. E. Vinogradov, V. E. Kuznetsov, P. G. Rutberg, V. V. Rybin, A. A. Safronov, V. I. Shekalov, and V. N. Shiryaev, Patent RUS 2301474. April 29, 2005.