

## Инжектор плазмы на базе плазмотрона постоянного тока для низковольтного мощного плазмотрона переменного тока с рельсовыми электродами

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

*Для инициирования дуги трехфазного плазмотрона с рельсовыми электродами разработан инжектор плазмы на основе плазмотронов постоянного тока с торцевым катодом из композитного материала и медным анодом. Поджиг дуги в инжекторе осуществляется с помощью скользящего разряда на поверхности электроизоляционной втулки, расположенной между катодом и дополнительным электродом. Получены вольт-амперные характеристики инжектора в широком диапазоне токов и расходов газа. Описана возможность его работы в составе трехфазного плазмотрона переменного тока с рельсовыми электродами.*

*Ключевые слова:* инжектор плазмы, плазмотрон постоянного тока, мощный плазмотрон, вольт-амперная характеристика.

**Ссылка:** Кузнецов В. Е., Сафронов А. А., Васильева О. Б., Дудник Ю. Д., Ширяев В. Н. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 38.

**Reference:** V. E. Kuznetsov, A. A. Safronov, O. B. Vasilieva, Yu. D. Dudnik, and V. N. Shiryayev, Prikl. Fiz., No. 5, 38 (2018).

### Введение

В настоящее время широкое применение нашли плазмотроны переменного тока с рельсовыми электродами. Плазмотроны этого типа предназначены для нагрева больших объемов рабочего газа до среднемассовой температуры 1500–5500 К, и благодаря этому они могут найти широкое применение в различных отраслях науки и техники. В частности, на базе плазмотрона переменного тока разработана опытно-промышленная установка [1, 2], предназначенная для газификации, пиролиза, переработки или нейтрализации различных органических веществ, хлор- и фторсодержащих веществ и отходов, в т. ч. с целью получения синтез-газа.

В основе работы плазмотронов с рельсовыми электродами лежит принцип электродинамического движения дуг в поле собственного тока (т. н. рельсотронный эффект). Инициирование дуги в плазмотроне осуществляется с помощью инжектора плазмы. Он создает поток плазмы, необходимый для обеспечения зажигания основных дуг в зоне минимального межэлектродного промежутка при сравнительно низком напряжении силового питания. Такой поджиг позволяет стабильно инициировать дуги между электродами, установленными с минимальным зазором порядка 8–20 мм, при питании от промышленной электросети с напряжением порядка 300–500 В. Инициированные дуги затем перемещаются по расходящимся основным электродам [3, 4].

Целью данной работы является исследование процессов инициации электрической дуги в мощном плазмотроне переменного тока с рельсовыми электродами. В ходе работы ставилась задача исследовать возможность использования разных типов плазмотронов в качестве инжектора плазмы.

### Экспериментальная установка

В качестве инжектора плазмы может выступать либо однофазный высоковольтный плазмотрон переменного тока [5], либо плазмотрон постоянного тока. Инжектор на базе плазмотрона

---

Кузнецов Владимир Евгеньевич<sup>1</sup>, зав. лаб., к.т.н.  
Сафронов Алексей Анатольевич<sup>1,2</sup>, зав. лаб., д.т.н., профессор.  
Васильева Ольга Борисовна<sup>1</sup>, н.с.  
Дудник Юлия Дмитриевна<sup>1</sup>, м.н.с.  
Ширяев Василий Николаевич<sup>1</sup>, с.н.с.

<sup>1</sup> Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.  
Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18.  
E-mail: julia\_dudnik-s@mail.ru

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого.

Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

Статья поступила в редакцию 22 мая 2018 г.

---

© Кузнецов В. Е., Сафронов А. А., Васильева О. Б.,  
Дудник Ю. Д., Ширяев В. Н., 2018

переменного тока имеет ряд существенных недостатков, в число которых входят следующие обстоятельства: необходимость обеспечения безопасной эксплуатации при напряжении питающей сети 6–10 кВ, высокая стоимость источника питания, которую определяет наличие несерийного оборудования в виде токоограничивающих реакторов или высоковольтного трансформатора. Поэтому для успешного внедрения плазмотрона с рельсовыми электродами в промышленные технологии был разработан инжектор на основе постоянного тока, что позволило снизить класс напряжения питания установки до 1 кВ и существенно уменьшить стоимость источника питания.

На рис. 1 представлена конструкция инжектора на основе плазмотрона постоянного тока.

Инжектор состоит из водоохлаждаемого корпуса 1, выполненного из нержавеющей стали с кольцевой рубашкой охлаждения и внутренними каналами, соединенными со штуцерами 2 и 3, для

подвода и отвода воды, а также клеммой 4 (анод) для подключения основного питания. В водоохлаждаемом корпусе 1 расположен водоохлаждаемый электрод 5 (катод) со штуцерами 6 и 7 для подвода и отвода воды, электрическим быстросъемным разъемом 8, наконечником 9, изоляционными втулками 10 и 11. Между электродом 5 и корпусом 1 через изоляционные втулки 12 и 13 установлен поджигающий электрод 14 с электрической клеммой 15, с разрядным кольцом 16 и с соплом 17.

Впервые для изготовления катода в представленной конструкции инжектора использовался композитный материал состава железо-медь, который хорошо зарекомендовал себя в плазмотронах переменного тока [6, 7] при работе на воздухе. Плазмотрон подключен к системе водяного охлаждения с давлением 6 атм, а также к системе подачи плазмообразующего газа – воздуха, к системе питания, к импульсному устройству поджига основной дуги.

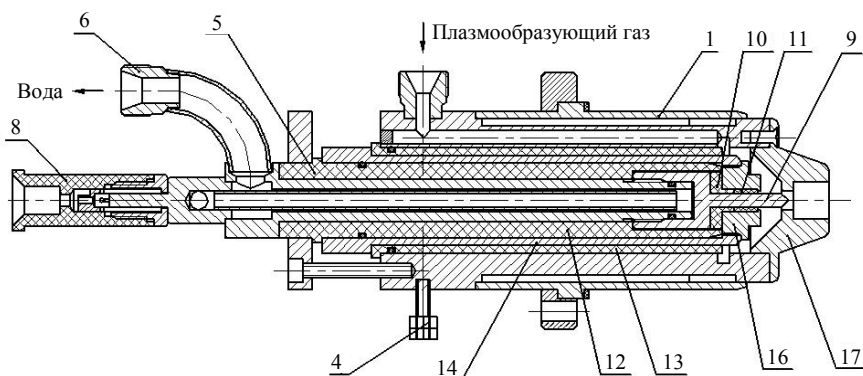


Рис. 1. Конструкция инжектора на основе плазмотрона постоянного тока. Классификация узлов дана в тексте статьи.

Принцип действия инжектора состоит в следующем: при включении устройства поджига осуществляется подача высоковольтного импульса, в результате чего происходит пробой зазора между электродами 9 и разрядным кольцом 16 по поверхности втулки 11. Между наконечником 9 электрода 5 и разрядным кольцом 16 образуется сгусток плазмы, который под действием электродинамических сил с потоком плазмообразующего газа попадает в зазор между электродами, где происходит его пробой и загорается основная дуга между электродом 9 и соплом 17. Для осуществления поджига использовался разряд [8] по поверхности диэлектрика на основе фенолформальдегидных смол.

Источник питания инжектора состоит из тиристорного регулятора, токоограничивающих реакторов и диодного моста. Источник питания позволяет регулировать напряжение холостого хода источника питания в диапазоне от 0 до 500 В при токе до 100 А. Ограничение тока происходит за счет реакторов, величина падения напряжения на дуге зависит от рабочих параметров и особенностей конструкции плазмотрона.

### Результаты экспериментов

На рис. 2 представлена вольт-амперная характеристика для расходов газа в диапазоне  $G = 1–3$  г/с, которая имеет падающий характер при фиксированной длине дуги в плазмотроне.

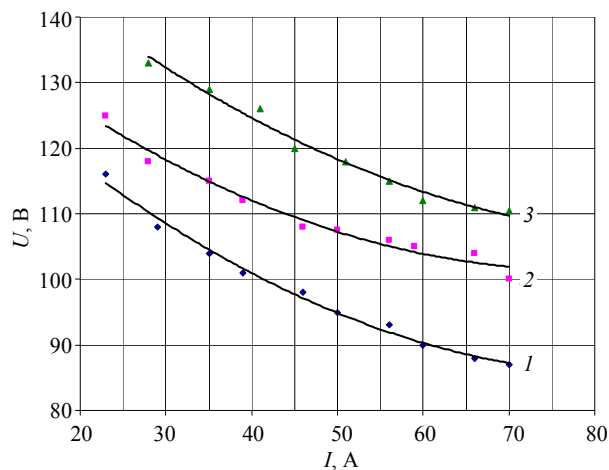


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика инжектора при расходах газа: 1 –  $G = 1$  г/с, 2 –  $G = 2$  г/с, 3 –  $G = 3$  г/с.

На рис. 3 представлен расчет зависимости мощности инжектора от расхода газа.

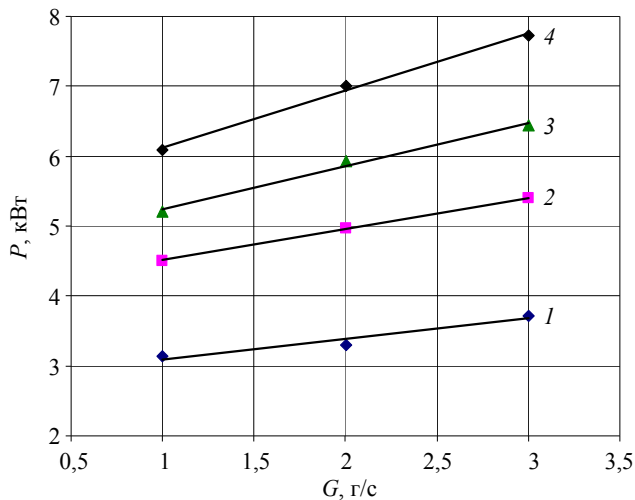


Рис. 3. Зависимость мощности  $P$  инжектора от расхода газа  $G$  при различных токах: 1 –  $I=28$  А, 2 –  $I=56$  А, 3 –  $I=46$  А, 4 –  $I=70$  А.

Для сравнения параметров инжекторов на базе плазмотронов переменного и постоянного тока были выполнены измерения температуры струи плазмы на срезе сопла этих плазмотронов при расходе газа 2 г/с. Результаты измерений можно видеть на рис. 4.

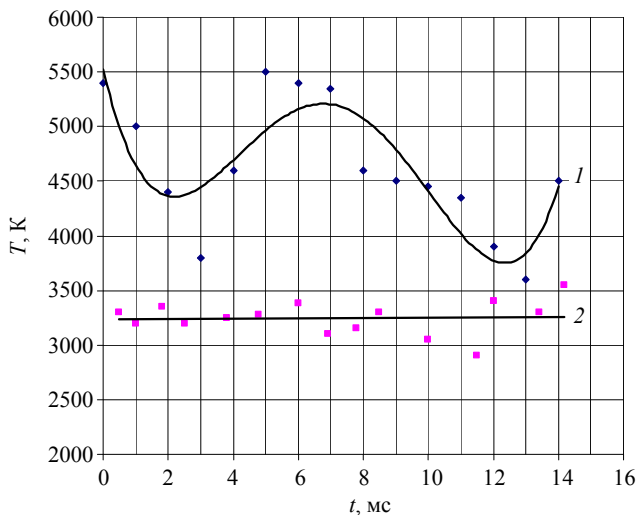


Рис. 4. Значения температуры струи плазмы инжектора при токах: 1 – переменный, 2 – постоянный.

Точка измерения находилась на одинаковом расстоянии (3 см) от среза сопла в обоих случаях. Более низкие температуры струи плазмы инжектора постоянного тока можно объяснить меньшей почти в 2 раза мощностью плазмотрона. Также можно заметить отсутствие флуктуаций температуры при использовании инжектора постоянного тока. При этом уменьшение температуры не ока-

зывает негативного воздействия на поджиг основных дуг плазмотрона переменного тока с рельсовыми электродами.

## Заключение

Создан и исследован инжектор плазмы на базе плазмотрона постоянного тока с катодом из композитного материала состава железо-медь. Инициирование дуги в нем осуществляется скользящим разрядом по поверхности диэлектрика. Измерены вольт-амперные характеристики и зависимости мощности инжектора от расхода рабочего газа.

Как показали предварительные испытания, данный инжектор обеспечивает надежный поджиг дуг основного плазмотрона переменного тока с рельсовыми электродами в сравнительно небольшом диапазоне регулирования расхода воздуха 1–3 г/с при устойчивой плазменной струе.

Проведенные испытания демонстрируют возможность замены высоковольтного плазмотрона инжектора плазмотроном постоянного тока с обеспечением стабильности параметров работы всей плазменной установки. Некоторое снижение температуры плазменной струи инжектора постоянного тока не оказывает негативного воздействия на стабильность поджига основных дуг и рабочие параметры трехфазного плазмотрона с рельсовыми электродами.

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. Сафронов А. А., Рутберг Ф. Г. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2007. Т. 50. № 9-2. С. 69.
2. Beck R. W. Review of plasma arc gasification and verification technology for waste disposal – Honolulu, 2003.
3. Rutberg Ph. G., Safronov A. A., Surov A. V., Popov S. D. / В сборнике: XXVIII International Conference on Phenomena in Ionized Gases proceedings. 2007. С. 1774.
4. Rutberg Ph. G., Safronov A. A., Popov S. D., Surov A. V., Nakonechnyi G. V. // High Temperature. 2006. Vol. 44. No. 2. P. 199.
5. Kuznetsov V. E., Safronov A. A., Shiryaev V. N., Vasylieva O. B., Pavlov A. V., Dudnik Yu. D., Kuchina Yu. A. // Journal of Physics Conference Series. 2018. Vol. 946. No. 1. P. 012166.
6. Виноградов С. Е., Васильева О. Б., Кузнецов В. Е., Кузьмин К. А., Сафронов А. А., Овчинников Р. В., Шекалов В. И., Ширяев В. Н. // Вопросы материаловедения. 2010. № 4 (64). С. 111.

7. Rutberg P. G., Safronov A. A., Kuznetsov V. E., Vinogradov S. E., Shekalov V. I., Ovchinnikov R. V. // High Temperature Material Processes: an international journal. 2009. Vol. 13. No. 1. P. 61.

8. Рутберг Ф. Г., Сафронов А. А., Григорьев М. А., Муравьев В. В. Авторское свидетельство № 1238705 от 15.02.86.

PACS: 52.75.Hn

## Plasma injector based on a direct current plasma torch for low-voltage high-power alternating current plasma torch with rail electrodes

*V. E. Kuznetsov<sup>1</sup>, A. A. Safronov<sup>1,2</sup>, O. B. Vasilieva<sup>1</sup>, Yu. D. Dudnik<sup>1</sup>, and V. N. Shiryaev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
29 Polytechnicheskaya str., St. Petersburg, 195251, Russia

*Received May 22, 2018*

***A plasma injector based on direct current plasma torches with an end cathode made of a composite material and a copper anode was developed in order to initiate the arc of a three-phase plasma torch with rail electrodes. The arc is ignited in the injector by a sliding discharge on the surface of the electrical insulating bushing located between the cathode and the additional electrode. Volt-ampere characteristics of the injector in a wide range of currents and gas flows have been obtained. The possibility of its operation in the composition of a three-phase AC plasma torch with rail electrodes is described.***

***Keywords:*** plasma injector, dc plasma torch, powerful plasma torch, volt-ampere characteristic.

### REFERENCES

1. A. A. Safronov and Ph. G. Rutberg, Russian Phys. Journ. **50** (9-2), 69 (2007).
2. R.W. Beck, *Review of plasma arc gasification and verifications technology for waste disposal* (Honolulu, 2003).
3. Ph. G. Rutberg, A. A. Safronov, A. V. Surov, and S. D. Popov, in *Proc. XXVIII International Conference on Phenomena in Ionized Gases*. (2007). P. 1774.
4. Ph. G. Rutberg, A. A. Safronov, S. D. Popov, A. V. Surov, and G. V. Nakonechnyi, High Temperature **44** (2), 199 (2006).
5. V. E. Kuznetsov, A. A. Safronov, V. N. Shiryaev, O. B. Vasilieva, A. V. Pavlov, Yu. D. Dudnik, and Yu. A. Kuchina, Journal of Physics Conference Series **946** (1), 012166 (2018).
6. S. E. Vinogradov, O. B. Vasilieva, V. E. Kuznetsov, K. A. Kuzmin, A. A. Safronov, R. V. Ovchinnikov, V. I. Shekalov, and V. N. Shiryaev, Voprosy Materialovedeniya **4** (64), 111 (2010).
7. P. G. Rutberg, A. A. Safronov, V. E. Kuznetsov, S. E. Vinogradov, V. I. Shekalov, and R. V. Ovchinnikov, High Temperature Material Processes: an international journal **13** (1), 61 (2009).
8. Ph. G. Rutberg, A. A. Safronov, M. A. Grigor'ev, and V. V. Murav'ev, USSR Inventor's Certificate No. 1238705, February 15, 1986.