= ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ — ТЕХНИКА —

УДК 533.9.07

ПЛАЗМОТРОНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. СИСТЕМЫ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДУГИ. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ПРИМЕНЕНИЯ

© 2019 г. А. А. Сафронов^{*a*}, В. Е. Кузнецов^{*a*}, О. Б. Васильева^{*a*}, Ю. Д. Дудник^{*a*,*}, В. Н. Ширяев^{*a*}

^а Институт электрофизики и электроэнергетики РАН Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18 *e-mail: julia_dudnik-s@mail.ru Поступила в редакцию 26.07.2018 г. После доработки 26.07.2018 г. Принята к публикации 10.10.2018 г.

Цикл статей посвящен исследованию мощных плазмотронов переменного тока, имеющих различные конструкции, назначение и характеристики, позволяющие обеспечивать работу генератора плазмы определенного типа в широком диапазоне мощности и давлений. Первая часть посвящена исследованию плазмотронов переменного тока, имеющих специфическое назначение – инициирование дуги мощного плазмотрона. В статье подробно освещены особенности конструкции плазмотрона, характеристики, параметры плазменного потока, такие как температура, теплосодержание и т.д., рассмотрены особенности работы и различные варианты вспомогательных плазмотронов-инжекторов, обеспечивающих зажигание основной дуги в электроразрядной камере.

DOI: 10.1134/S0032816219020307

1. ВВЕДЕНИЕ

Возможность эффективного использования плазмотронов в составе энергетических установок показана многими авторами [1–3].

Следует отметить, что использование плазмотронов для получения синтез-газа является весьма перспективным, поскольку благодаря конструктивным особенностям плазмотронов переменного тока [4—8] достаточно легко в рамках одной установки могут быть реализованы различные подходы к проведению этого процесса. К ним, в частности, относятся: сжигание при недостатке кислорода, пиролиз с присутствием водяного пара или комбинация этих методов. В настоящий момент ведутся исследования, целью которых является создание конструкции плазмотрона, имеющего возможность технологического применения в плазмохимических и других установках или реакторах, работающих при повышенном давлении [9].

Создание плазмотронов для процесса термической деструкции углеводородов с целью получения синтез-газа и выделения водорода требует понимания процессов и знания об основных параметрах получаемой плазмы и взаимовлиянии этих параметров на режимы работы плазмотрона. Для достижения этой цели были выполнены исследования при комбинации плазмотрона переменного тока с инжекторами плазмы двух типов — плазмотронами переменного и постоянного тока.

В первой части работы рассматриваются конструкции плазмотронов, обеспечивающих ини-



Рис. 1. Схема плазмотрона с рельсовыми электродами. *1* – инжектор; *2* – основной электрод; *3* – изолятор; *4* – токоввод; *5* – водоохлаждаемый корпус; *6* – контуры тангенциальной газовой подачи.



Рис. 2. Однофазный плазмотрон переменного тока с охлаждаемым электродом. *1* – корпус; *2* – проходные изоляторы; *3* – сменные наконечники электродов; *4* – сопло.

циирование работы мощного генератора плазмы, и связанные с этим особенности характеристик и режимов.

2. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИПА РАБОТЫ

2.1. Трехфазный плазмотрон переменного тока

Схема однокамерного трехфазного плазмотрона переменного тока с рельсовыми электродами представлена на рис. 1.

Плазмотрон состоит из следующих основных элементов: корпуса, выходного фланца с соплом, системы электродов и инжектора. Корпус изготовлен из нержавеющей стали и представляет собой цилиндр, переходящий в усеченный конус. Охлаждение корпуса — водяное. Он способен работать с нейтральными (азот, инертные газы) и с окислительными (воздух) средами; диапазон расхода воздуха от 15 до 70 г/с; его мощность варьируется от 100 до 500 кВт.

Принцип работы плазмотрона данной конструкции основан на быстром перемещении основных дуг по расходящимся электродам со скоростью 10—30 м/с, зависящей от величины тока, угла наклона электродов, а также расхода и способа подачи рабочего газа. Дуги заполняют большую часть разрядной камеры, совершая движение в продольном и поперечном направлениях.

В основу работы плазмотронов с рельсовыми электродами положен принцип электродинамического движения дуг в поле собственного тока – так называемый рельсотронный эффект. Инициирование дуги в плазмотроне осуществляется с помощью инжектора плазмы. Он создает поток плазмы, необходимый для обеспечения достаточной для зажигания основных дуг концентрации электронов в зоне минимального межэлектродного промежутка при сравнительно низком напряжении силового питания. Это 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 [10]. Инициированные дуги перемещаются по расходящимся основным электродам. Распределение тепловой нагрузки по длине электрода осуществляется за счет быстрого перемещения точки привязки дуги по электроду под действием электродинамических и газодинамических сил. Это дает возможность использовать водоохлаждаемые электроды, выполненные из относительно легкоплавкого материала с высокой теплопроводностью, в частности меди [11].

Для обеспечения зажигания основных дуг необходимо получить поток плазмы с концентрацией электронов $n_e \sim 10^{14} - 10^{16}$ см⁻³, что требует наличия инжектора плазмы в зоне минимального расстоя-



Рис. 3. Конструкция плазмотрона-инжектора постоянного тока. 1 — водоохладжаемый корпус; 2, 3 штуцеры; 4 — анод; 5 — катод; 6, 7 — каналы со штуцерами; 8 — электрический быстросъемный разъем; 9 наконечник; 10—13 — изоляционные втулки; 14 поджигающий электрод; 15 — электрическая клемма; 16 — разрядное кольцо; 17 — сопло.



Рис. 4. Осциллограммы силы тока и падения напряжения однофазного плазмотрона переменного тока с массовым расходом воздуха 1 г/с.

ния между основными электродами плазмотрона. В качестве инжектора плазмы может применяться плазмотрон как переменного, так и постоянного тока и небольшой мощности, 10 кВт.

2.2. Однофазный плазмотрон-инжектор переменного тока

На рис. 2 представлена схема высоковольтного однофазного плазмотрона-инжектора переменного тока. Плазмотрон состоит из следующих основных элементов: корпуса, выходного фланца с соплом, электродов со сменными наконечниками. Основной конструктивной особенностью плазмотронов данного типа является наличие двух цилиндрических каналов, которые с одной стороны сходятся под небольшим углом и переходят в общее сопло, в них же расположены торцевые электроды. Каналы помещены в водоохлаждаемый корпус, а электроды подключаются к однофазному источнику питания. Электроды изготовлены из меди или композиции материалов [12–16].

Принцип работы однофазного плазмотрона переменного тока следующий. Под воздействием высокого напряжения 6 кВ, прикладываемого между электродами, происходит электрический пробой воздушного промежутка между стенкой каждого канала и буртом наконечника-электрода. Загораются две дуги, которые под воздействием газового потока, подаваемого тангенциально в каналы, выдуваются на торцы электрода и далее, перемещаясь по стенкам каналов, выходят на их концы и замыкаются между собой в электроразрядной камере. Дуга начинает гореть от торца од-



Рис. 5. Зависимости действующего падения напряжения на дуге от массового расхода газа для однофазного плазмотрона переменного тока при разных токах уставки (короткого замыкания), рабочий газ – воздух.

ного электрода до торца другого. В случае погасания дуги процесс повторяется.

После формирования первичного разряда набегающий поток газа вытягивает электрическую дугу таким образом, что один ее конец выходит на торец электрода, а второй, скользя по поверхности канала, — за пределы канала. Две дуги замыкаются в области сопла. Таким образом, до выхода на нормальный режим работы электрические дуги двух фаз замыкаются через стенки каналов и корпус плазмотрона. Все это осуществляется только при условии, что длина канала плазмотро-



Рис. 6. Вольт-амперные характеристики дуги однофазного плазмотрона переменного тока для разных значений расхода газа.



Рис. 7. Вольт-амперные характеристики однофазного плазмотрона переменного тока с каналом длиной 240 мм (а) и 220 мм (б) для разных значений расхода газа (цифры у кривых).

на подобрана в соответствии с возможной длиной дуги, определяемой параметрами источника питания и характером течения рабочего газа. При изменении полярности дуга вновь зажигается в канале, в котором еще остаются в достаточном количестве носители заряда от предыдущей части периода тока. Если же по каким-то причинам дуга гаснет, то ее инициация опять происходит в зоне первичного пробоя.

Сформированный в канале спиралевидный поток газа отводит от центра дуги излишнее тепло, не давая сформироваться разного рода неустойчивостям плазменного канала, которые могли бы возникнуть из-за существенных градиентов температуры.



Рис. 8. Зафиксированные значения температуры плазмы инжектора.

Достоинством данной конструкции однофазного инжектора переменного тока является ее простота, а недостатком — довольно значительные колебания температуры исходящей струи плазмы, что может приводить к нестабильности поджига основных дуг мощного плазмотрона [17].

Однако как инжектор плазмотрон такого типа имеет ряд существенных недостатков, в число которых входят: необходимость обеспечения безопасной эксплуатации при напряжении питающей сети 6—10 кВ, а также высокая стоимость источника питания, определяемая в основном наличием несерийного оборудования в виде токоограничивающих реакторов или высоковольтного трансформатора.

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.

2.3. Однофазный плазмотрон-инжектор постоянного тока

На рис. 3 представлена конструкция однофазного плазмотрона-инжектора постоянного тока. Плазмотрон-инжектор состоит из водоохлаждаемого корпуса *1*, выполненного из нержавеющей стали с кольцевой рубашкой охлаждения и внутренними каналами, оканчивающимися штуцерами *2* и *3* для подвода и отвода воды. Клемма *4* (анод) служит для подключения основного питания. В водоохлаждаемом корпусе *1* расположен водоохлаждаемый электрод *5* (катод) со штуцера-



Рис. 9. Вид дуги инжектора в различные моменты времени. Фотографии сделаны через выходное сопло плазмотрона.

ми 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, разрядным кольцом 16 и соплом 17. Между электродом 9 и втулкой 16 образуется зазор A, а между электродом 9 и соплом 17 – зазор Б.

Плазмотрон подключен к системам питания, охлаждения, подачи плазмообразующего газа, к устройству поджига основной дуги. При включении устройства поджига высоковольтный импульс подается на клеммы 15 и 5, и в результате происходит пробой зазора A по поверхности втулки 11. Между наконечником 9 электрода 5 и разрядным кольцом 16 образуется сгусток плазмы, который под действием электродинамических сил и потока плазмообразующего газа попадает в зазор Б. Происходит пробой зазора, и загорается основная дуга между электродом 9 и соплом 17.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ

3.1. Однофазный плазмотрон-инжектор переменного тока

Рассмотрим основные характеристики однофазного плазмотрона переменного тока. На рис. 4 представлены осциллограммы силы тока и падения напряжения на дуге.

На рис. 5 показаны зависимости действующего падения напряжения на дуге от массового расхода газа, а на рис. 6 — вольт-амперные характеристики дуги плазмотрона, построенные также по действующим значениям.

Для плазмотронов переменного тока со стержневыми электродами изменение геометрических размеров позволяет влиять на характеристики плазмотрона. Так, при изменении длины электродных каналов изменяется падение напряжения на дуге, что, в конечном итоге, определяет мощность плазмотрона. На рис. 7 приведены вольт-амперные характеристики однофазных плазмотронов переменного тока с каналами разной длины.

Спектроскопическим методом была измерена температура на горизонтальной оси инжектора [18] в точке, отстоящей на 0.03 м от среза сопла, что соответствует наименьшему расстоянию между основными электродами плазмотрона. Эксперименты проводились без учета основного газового потока. Расход воздуха через инжектор составил 2.3 г/с ($P_{\text{раб}}$ = 3 атм, диаметр расходной шайбы 2.2 мм), мощность 8.4 кВт (рабочий ток 7 А).

Так как в состав электродов входит медь, то измерения температуры проводились по отношению интенсивностей линий с длиной волны 510.56 нм, 515.32 нм, 521.32 нм, плазма при этом



Рис. 10. Вольт-амперные характеристики плазмотрона-инжектора постоянного тока для разных значений расхода газа (цифры у кривых).



Рис. 11. Зависимости мощности от расхода газа при разных токах уставки.

полагалась оптически тонкой. В связи с этим температуру (T, K) оптически тонкой плазмы в состоянии локального термодинамического равновесия можно определить из соотношения:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 g_1 \lambda_1}{A_2 g_2 \lambda_2} \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{kT}\right),\tag{1}$$

где I_1 , I_2 — отношения интенсивности; A_1 , A_2 — вероятности спонтанных переходов между линиями с длиной волны λ_1 и λ_2 ; g_1 , g_2 — статистические веса; E_1 , E_2 — энергии верхних уровней; k — постоянная Больцмана; T — температура.

Характерный график изменения температуры приведен на рис. 8.

Наблюдаемые колебания температуры вызваны пульсациями тока дуги, неустойчивостью положения дуги в пространстве (рис. 9).

Так как рассматриваемая область имеет конечную протяженность, то полученные в каждый момент времени значения температуры соответствуют максимальному значению. Среднее значение температуры за время эксперимента составило $T = 4662 \pm 930$ К.

Оценку концентрации электронов в предположении наличия ионизационного равновесия можно получить из соотношения:

$$\frac{N_e^2}{N_a} = \frac{g_e g_i}{g_a} \left(\frac{m_e}{2\pi\hbar}\right)^{3/2} T^{3/2} e^{1/T},$$
(2)

где N_a , N_e — полное число атомов и электронов; g_e , g_i , g_a — статистические веса электронов, ионов и атомов; m_e — масса электрона; \hbar — постоянная Планка; T — температура; I — потенциал ионизации.

Значение концентрации составило 10¹⁹-10²⁰ м⁻³.



Рис. 12. Взаимное расположение основных электродов плазмотрона и инжектора. *a* – расстояние от среза сопла инжектора до точки минимального схождения электродов плазмотрона, *b* – расстояние между основными электродами плазмотрона.



Рис. 13. Наведенное на основные электроды напряжение при работающем инжекторе: $\mathbf{a} - \mathbf{c}$ каналами стандартной длины; $\mathbf{b} - \mathbf{c}$ удлиненными каналами. Расход рабочего газа 3 г/с.

3.2. Плазмотрон-инжектор постоянного тока

На рис. 10 приведены вольт-амперные характеристики разработанного плазмотрона постоянного тока, которые имеют падающий характер при фиксированной длине дуги в плазмотроне данной конструкции. Расход рабочего газа составил 2 г/с.

Также были получены зависимости мощности инжектора от расхода газа, представленные на рис. 11.

3.3. Сравнение полученных результатов для двух инжекторов переменного тока с различной длиной каналов

Как показали испытания инжектора, устойчивый поджиг дуги осуществляется при расстоянии *b* между электродами до 20 мм и расстоянии между срезом сопла и точкой минимального схождения электродов до 50 мм (рис. 12). Косвенным критерием эффективности работы инжектора может служить такая величина, как напряженность электрического поля, создаваемого работающим инжектором в пространстве между основными электродами. На рис. 13 приведены графики наведенного на основные электроды потенциала при работающих инжекторах с различной длиной электродных каналов, измерения напряжения проводились в каждой фазе плазменного генератора. На рис. 13 также приведена осциллограмма рабочего тока инжектора в момент проведения измерений.

Подобные кривые позволяют продемонстрировать качественное отличие картины ионизации межэлектродного промежутка при работе инжектирующих плазмотронов различных типов. Так, видно, что для конструкции с удлиненными каналами пики напряжения присутствуют в каждом периоде тока, тогда как в другом случае имеются пропуски периодов, при этом при подаче основного напряжения наблюдается нерегулярный пробой межэлектродного промежутка, что, по всей видимости, обусловлено недостаточной степенью его ионизации.

На рис. 14 приведены осциллограммы тока и напряжения для инжекторов двух типов при одинаковом расходе рабочего газа.

Также были выполнены измерения температуры струи плазмы этих плазмотронов (рис. 15). В обоих случаях точка измерения находилась на одинаковом расстоянии, которое составило 3 см от среза сопла. Более низкие температуры струи плазмы инжектора постоянного тока можно объяснить меньшей почти в два раза мощностью плазмотрона.

На рис. 15 можно заметить отсутствие флуктуаций температуры при использовании инжектора постоянного тока. При этом уменьшение абсолютного значения температуры не оказывает негативного воздействия на поджиг основных дуг плазмотрона переменного тока с рельсовыми электродами.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе рассмотрены конструкции ряда вспомогательных плазмотронов разной мощности. На основании изложенного материала можно сделать следующие выводы:

 к положительным качествам плазмотронов переменного тока можно отнести простоту конструкции, надежность и удобство эксплуатации, широкий диапазон и наличие потенциальной возможности регулирования рабочих параметров плазмотрона;

 к недостаткам этих систем относятся достаточно высокая стоимость источника питания, определяемая наличием специфического несе-



Рис. 14. Осциллограммы тока и напряжения инжекторов переменного тока с разной длиной электродного канала, снятые при одинаковом расходе (2 г/с) рабочего газа.

рийного оборудования, и необходимость использования высокого напряжения для обеспечения поджига дуги.

Представленный в статье плазмотрон постоянного тока при использовании его в качестве инжектора позволяет понизить класс напряжения для плазменной установки до 1000 В.

Для рассмотренных конструкций плазмотронов переменного тока получены рабочие характеристики, определены их зависимости от параметров конструкции плазмотрона, проведены расчеты параметров в электроразрядной камере плазмотрона.

Полученные данные позволяют выполнять расчеты и проектирование научно-исследовательских



Рис. 15. Изменение температуры плазмы инжекторов переменного (*1*) и постоянного (*2*) тока.

держке программы президиума ГАН № 51 Фундаментальные исследования физико-технических проблем энергетики" по направлению "Фундаментальные аспекты новых плазменных технологий производства водорода из органического сырья для водородной энергетики".

технологических установок различного назначе-

ния на основе плазмотронов переменного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Sahu S.G., Chakraborty N., Sarkar P. // Renewable Sustainable Energy Rev. 2014. V. 39. P. 575. https:// doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.106
- Gorokhovski M.A., Jankoski Z., Ockwood F.C., Karpenko E.I., Messerle V.E., Ustimenko A.B. // Combust. Sci. Technol. 2007. V. 179. № 10. P. 2065. doi 10.1080/ 00102200701386115
- 3. Askarova A., Karpenko E., Lavrishcheva Y., Messerle V.E., Ustimenko A.B. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2007. V. 35. № 6. P. 1607.
- Рутбере Ф.Г., Сафронов А.А., Ширяев В.Н., Кузнецов В.Е. // Материалы конференции по физике низкотемпературной плазмы ФНТП-98. Петрозаводск: Изд-во ПГУ, 1998. С. 578.
- Rutberg Ph.G., Kumkova I.I., Kuznetsov V.E., Popov S.D., Rutberg A.P., Safronov A.A., Shiryaev V.N., Surov A.V. // Proc. Pulsed Power Plasma Science PPPS-2007: Pulsed Power and Plasma Science. The 16th IEEE Int. Pulsed Power Conf. and The 34th IEEE Int. Conf. on Plasma Science. Albuquerque, NM, 2007. C. 1556.
- Васильева О.Б., Кумкова И.И., Кузнецов В.Е., Рутберг А.Ф., Сафронов А.А., Ширяев В.Н. // ТВТ. 2015. Т. 53. № 4. С. 494.
- Vasilieva O.B., Kumkova I.I., Kuznetsov V.E., Rutberg A.P., Safronov A.A., Shiryaev V.N. // High Temp. 2015. V. 53. № 4. P. 470.
- 8. Rutberg Ph.G., Safronov A.A., Bratsev A.N., Kuznetsov V.E. // IEEE Int. Conf. on Plasma Sci. 1998. P. 226.

doi 10.1109/PLASMA.1998.67775810.1109/PLAS-MA. 1998.677758

- 9. Safronov A.A., Vasilieva O.B., Dudnik J. D., Kuznetsov V.E., Shiryaev V.N. // High Temp. 2017. V. 55. № 5. P. 638. doi 10.1134/S0018151X17050157
- 10. Рутберг Ф.Г., Гончаренко Р.Б., Сафронов А.А., Ширяев В.Н., Кузнецов В.Е. // Известия РАН. Энергетика. 1998. № 1. С. 93.
- Рутбере Ф.Г., Сафронов А.А., Гончаренко Р.Б., Кузнецов В.Е. // Известия РАН. Энергетика. 1996. № 4. С. 114.
- Rutberg Ph.G., Safronov A.A., Kuznetsov V.E., Vinogradov S.E., Shekalov V.I., Ovchinnikov R.V. // High Temp. Mater. Processes. 2009. V. 13. № 1. P. 61. doi 10.1615/ HighTempMatProc.v13.i1.40
- 13. *Будин А.В., Пинчук М.Э., Кузнецов В.Е., Рутберг* Ф.Г. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 23. С. 49.
- 14. Кузнецов В.Е., Киселев А.А., Овчинников Р.В., Дудник Ю.Д. // Научно-технические ведомости

СПбГПУ. Физико-математические науки. 2012. Т. 2. № 146. С. 100.

- Кузнецов В.Е., Овчинников Р.В., Сподобин В.А., Ширяев В.Н., Никонов А.В., Лукьянов С.А., Васильева О.Б. // Известия вузов. Физика. 2007. Т. 50. № \$9. С. 206.
- 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.
- Rutberg Ph.G., Kumkova I.I., Kuznetsov V.E., Shiryaev V.N., Surov A.V. // IEEE International Pulsed Power Plasma Sci. (PPPS-2007) 2007. V. 2. P. 1556. doi 10.1109/ PPPS.2007.4652484
- Safronov A.A., Vasilieva O.B., Dudnik Yu.D., Kuznetsov V.E., Shiryaev V.N., Subbotin D.I., Pavlov A.V. // J. of Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 825. № 1. P. 012013. doi 10.1088/ 1742-6596/825/1/012013