

04;15

Мощный генератор низкотемпературной плазмы воздуха с расширяющимся каналом выходного электрода

© М.Х. Гаджиев, Э.Х. Исакаев, А.С. Тюфтяев, Д.И. Юсупов

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва
E-mail: makhach@mail.ru

Поступило в Редакцию 4 марта 2015 г.

Разработан и исследован мощный генератор высокоэнтальпийной воздушной плазменной струи ($H \geq 20$ кДж/г) с расширяющимся каналом выходного электрода, относящийся к классу плазмотронов постоянного тока с термоэмиссионным катодом с КПД $\approx 80\%$, обеспечивающий формирование на выходе слабо расходящейся ($2\alpha = 12^\circ$) плазменной струи диаметром $D = 50$ мм и среднemasсовой температурой 6000–9000 К.

Генератор низкотемпературной плазмы (ГНП) привлекает к себе внимание специалистов как в области физики газового разряда и низкотемпературной плазмы, так и в области высокотемпературной газодинамики тем, что в разрядном промежутке ГНП диапазон температур меняется от тысяч до десятков тысяч градусов, что представляет несомненный интерес для исследования теплофизических, электродинамических и оптических свойств газов, а также для осуществления различных плазмохимических реакций [1-4]. Возможность получения гомогенных и гетерогенных потоков газа с заданными давлениями и температурой в интервале скоростей вплоть до сверхзвуковых делают ГНП уникальным инструментом для моделирования взаимодействия высокотемпературного потока с поверхностью любого материала, включая исследования разрушения теплозащитного покрытия летательных аппаратов. Интерес к плазмотронам постоянного тока вызван тем, что с их помощью можно получить сверхвысокие температуры, недостижимые, например, химическими методами, на надежном и компактном оборудовании с возможностью регулирования в широком диапазоне мощности и расхода различных плазмообразующих газов.

Для науки и техники представляют интерес мегаваттные генераторы для создания высокоэнтальпийных плазменных потоков воздуха большого диаметра применительно к плазмохимическим технологиям. В связи с этим основной целью работы является разработка эффективного высокоресурсного генератора низкотемпературной воздушной плазмы.

В разработку основ таких плазмотронов могут быть положены маломощные ГНП с расширяющимся каналом выходного электрода [5,6]. Выбор в пользу этого типа плазмотрона связан с тем, что такая конструкция обеспечивает горение дуги в ламинарном потоке при высокой скорости газа на входе в сопло, а также эффективность нагрева рабочей среды при малых тепловых потерях в водоохлаждаемые части устройства. Обычно ГНП с продольным потоком газа выполняются с цилиндрическим каналом постоянного сечения. Электрический разряд, особенности течения высокотемпературного газа и параметры самого генератора плазмы с таким каналом достаточно хорошо известны [7,8]. Недостатками плазмотрона с каналом постоянного сечения являются падающая вольт-амперная характеристика (ВАХ), неустойчивые режимы работы, низкий тепловой коэффициент полезного действия (КПД), из-за чего для достижения нужной среднemasсовой температуры плазмы на выходе необходимо вкладывать большую мощность, что влияет на ресурс, энергоэффективность и стабильность работы плазмотрона.

Разработанный плазмотрон (рис. 1) представляет собой устройство с элементами специальной конструкции (катод, сопла и анод), обеспечивающий относительно большую производительность нагрева воздуха. Для защиты катода от эрозии при работе в химически активной среде в промежутке между катодом 2 и первой межэлектродной вставкой (МЭВ) 3 подается азот с расходом 2 g/s, благодаря чему и создается в прикатодной области плазма азота. Ниже по каналу через воздушную вставку аксиально подается воздух с расходом до 16 g/s, который смешивается с плазмой азота и выдувается по разрядному каналу через МЭВ 4, 5 в анод 7, что позволяет сформировать на выходе плазмотрона слабо расходящуюся ($2\alpha = 12^\circ$) воздушную плазменную струю диаметром $D = 50 \text{ mm}$ со среднemasсовой температурой плазмы 6000–9000 K, которую подают в трубу охладителя 11 экспериментального стенда.

Для исследования параметров плазмы стенд оборудован вставкой 8 с 7-ю отверстиями, позволяющей проводить спектроскопию по всему плазменному потоку, а также зондом 9, подаваемым в плазменный поток на заданную глубину и требуемое время нахождения в данной точке.

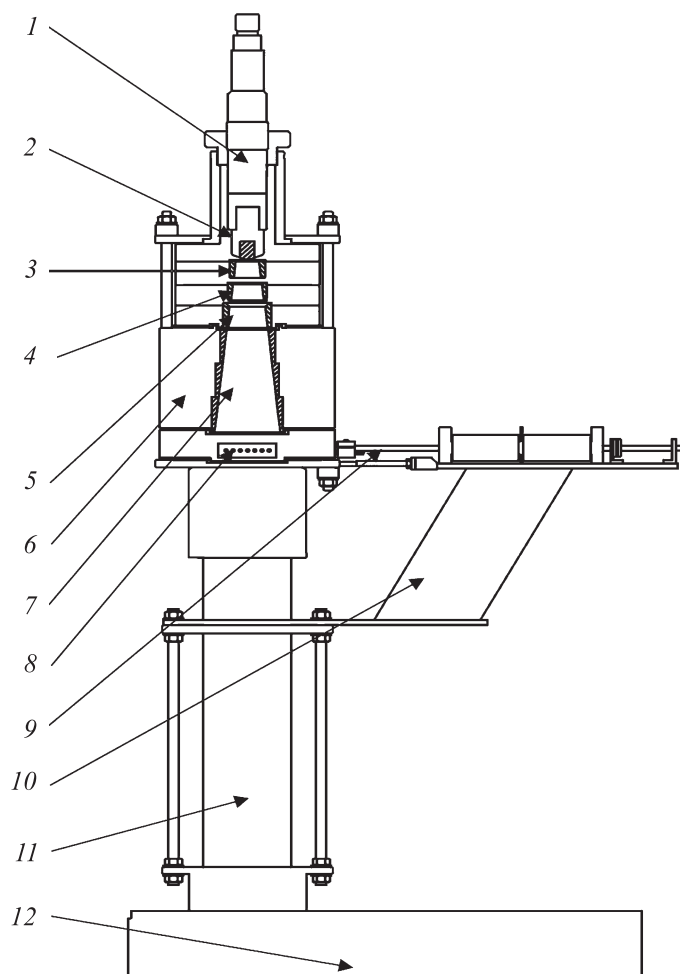


Рис. 1. Конструкция экспериментального стенда для воздушного плазмотрона: 1 — катододержатель; 2 — катод; 3–5 — МЭВ; 6 — анододержатель; 7 — анод; 8 — спектроскопическая вставка со смотровым окном; 9 — зонд; 10 — подставка для зонда; 11 — труба; 12 — бак охладителя.

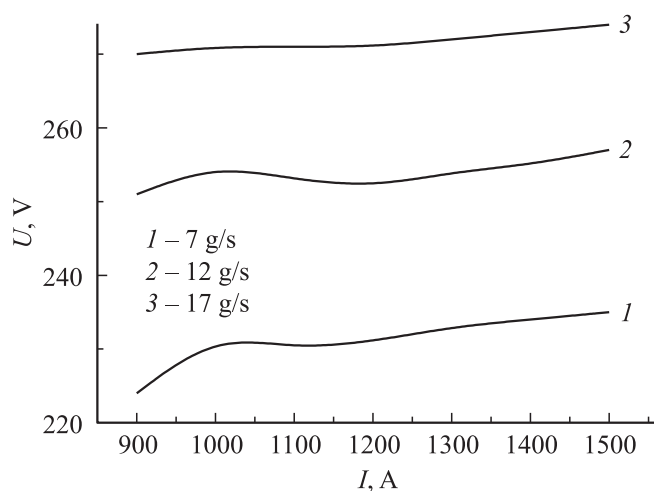


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика плазмотрона.

Одной из важнейших характеристик разряда в генераторе низкотемпературной плазмы является его вольт-амперная характеристика (ВАХ). При этом характер ВАХ определяет особенности электрической схемы.

На рис. 2 показана ВАХ разработанного генератора плазмы для различных расходов плазмообразующего газа. Видно, что ВАХ является слабо возрастающей с расширенной (по сравнению с дугами в цилиндрических каналах) зоной устойчивого горения.

У большинства ГНП с продольным потоком газа и самоустанавливающейся длиной дуги ВАХ имеет падающий характер из-за неустойчивости горения электрической дуги [4,7]. Во-первых, это влечет за собой жесткие требования к источнику электрического питания для стабилизации дуги. В таких генераторах для стабилизации дуги и термоизоляции ее от стенок канала применяются пористый вдув, аксиальные потоки или закрутка газа [4,9], а также делаются различные полости, уступы, диафрагмы, межэлектродные вставки [10], что усложняет их конструкцию. Во-вторых, с увеличением силы тока напряжение дуги падает, а значит, ее мощность увеличивается гораздо медленнее, чем ток, который во многом определяет ресурс ГНП. Все

это свидетельствует о предпочтении возрастающей вольт-амперной характеристики, которую можно получить в расширяющемся канале [5,6]. В данном случае распределение электрического тока по поверхности выходного электрода и соответственно магнитного поля повышает устойчивость положительного столба в разрядном промежутке. Длина дуги при этом уменьшается, тепловые потоки на стенки становятся более равномерными. При относительно больших скоростях газа в расширяющемся канале дуговой столб вблизи анодной привязки дуги может занимать значительную часть поперечного сечения, и в этом случае протекание тока происходит посредством коротких дуг между анодом и электропроводным ядром потока. Значительное уменьшение локальной плотности тока и удельного теплового потока на анод уменьшает эрозию выходного электрода [11]. Таким образом, отмеченные преимущества по сравнению с цилиндрическим каналом плазмотрона с расширяющимся каналом обеспечивают его эффективную работу при большем изменении параметров.

Для оценки КПД плазмотрона исследовали его тепловые характеристики. Тепловые потоки определяли измерением расходов и температуры воды на входах и выходах автономно охлаждаемых частей плазмотрона. По этим результатам КПД плазмотрона составил $\approx 80\%$.

Анализ полученных спектров воздушной плазмы с использованием трехканального оптоволоконного спектрометра AvaSpec 2048 показывает, что при токе дуги 1500 А приосевая и периферийная зоны плазменной струи имеют температуру до 15 000 и 8000–9000 К соответственно. Температуру электронов определяли методом относительных интенсивностей спектральных линий NI и OI с различающимися энергиями возбуждения верхних уровней [12]. В периферийных областях плазменной струи методом ее оценки могут служить относительные интенсивности многочисленных линий CuI (материал стенок плазмотрона) в области 400–525 nm, охватывающих широкий диапазон энергий возбуждения 3.82–8.00 eV. Концентрацию электронов плазмы воздуха оценивали по штарковской составляющей фойгтовских контуров линии H_{α} (линейный штарк-эффект) и атомной линии OI 725.4 nm (квадратичный штарк-эффект) [12]. В приосевой области плазмы плазмотрона концентрация электронов составляет величину $(3 \pm 1) \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

Создан малогабаритный мощный генератор низкотемпературной воздушной плазмы с расширяющимся каналом выходного электрода, отличающийся от традиционных электродуговых плазмотронов большими

ресурсом и КПД, эффективной работой при изменении параметров в широких пределах, позволяющий генерировать плазменный поток воздуха диаметром ~ 50 mm среднемаховой температурой 6000–9000 K с концентрацией электронов в приосевой области плазмы $\sim 10^{16}$ cm $^{-3}$. Полученные экспериментальные данные и инженерные решения могут служить исходными для проектирования промышленных установок с мощностью до 1 mW и выше.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 14-50-00124).

Список литературы

- [1] Rutberg Ph.G., Bratsev A.N., Safronov A.A. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. V. 30. N 4. P. 1445–1448.
- [2] Васильева О.Б., Кумкова И.И., Рутберг А.Ф., Сафронов А.А., Ширяев В.Н. // ТВТ. 2013. Т. 51. № 1. С. 36–40.
- [3] Амору Дж., Морван Д. и др. // ЖТФ. 2005. Т. 75. В. 5. С. 73–82.
- [4] Глебов И.А., Рутберг Ф.Г. Мощные генераторы плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 264 с.
- [5] Исакаев Э.Х., Синкевич О.А., Тюфтяев А.С., Чиннов В.Ф. // ТВТ. 2010. Т. 48. № 1. С. 105–134.
- [6] Тюфтяев А.С. // ТВТ. 2013. Т. 51. № 2. С. 183–190.
- [7] Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1975. 298 с.
- [8] Коротеев А.С., Миронов В.М., Свирчук Ю.С. Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет. М.: Машиностроение, 1993. 296 с.
- [9] Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы. Низкотемпературная плазма. Т. 17. Новосибирск: Наука, СП РАН, 1999. 712 с.
- [10] Лелевкин В.М., Семенов В.Ф. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 17. С. 31–36.
- [11] Исакаев Э.Х., Синкевич О.А., Спектор Н.О., Тазикова Т.Ф., Тюфтяев А.С., Хачатурова А.Г. // ТВТ. 2010. Т. 48. № 6. С. 816–827.
- [12] Очкин В.Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. М.: Физматлит, 2006. 472 с.