УДК 533.9.07

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-1-50-56

М.Х. Гаджиев, А.С. Тюфтяев, Э.Х. Исакаев, Н.А. Демиров

Генератор низкотемпературной воздушной плазмы для исследования взаимодействия плазменной струи с термостойкими материалами

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Объединенный институт высоких температур РАН»; Россия; 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2; takhash@mail.ru

Для исследования теплофизических, электродинамических и оптических свойств газов, а также осуществления различных плазмохимических реакций и исследования сублимации термостойких теплозащитных материалов создан генератор постоянного тока высокоэнтальпийной плазменной струи воздуха с вихревой стабилизацией и расширяющимся каналом выходного электрода. Для повышения КПД и тем самым уменьшения тепловых потерь в водоохлаждаемые части в конструкции генератора низкотемпературной плазмы предусмотрено совмещение анода с соплом, что позволило повысить КПД плазмотрона до 80 %. Для разработанного генератора низкотемпературной плазмы вольт-амперная характеристика имеет практически не меняющееся с увеличением силы тока напряжение горения дуги, в отличие от плазмотронов с цилиндрическим каналом газоразрядного тракта, где вольт-амперная характеристика преимущественно падающая. Это способствует повышению ресурса электродов и снижает требования к схеме управления источником электрического питания для стабилизации параметров дуги. Электрические, калориметрические и спектральные исследования показали, что созданный генератор низкотемпературной плазмы обеспечивает формирование на выходе из газоразрядного канала слабо расходящейся ($2\alpha = 12^\circ$) плазменной струи воздуха диаметром от 10 до 12 мм, с энтальпией $16 \div 40$ кДж/г, среднемассовой температурой $8 \div 11$ кК и с концентрацией электронов в приосевой плазме на срезе сопла $n_e \sim 10^{16}$ см⁻³ (при электрической мощности дугового разряда $20 \div 50$ кВт и расходе плазмобразующего газа $1 \div 2$ г/с). В зависимости от начальных условий на расстоянии $0 \div 30$ мм от среза сопла генератора низкотемпературной плазмы скорость потока плазмы меняется в пределах от 990 до 300 м/с.

Ключевые слова: *генератор низкотемпературной плазмы, плазмотрон, ВАХ, спектроскопия.*

Введение

Исследования сублимации материала тепловой защиты в химически активной среде являются весьма актуальными и представляют большой интерес для современной науки и техники [1, 2]. Особый интерес представляет исследование интенсивного, разрушающего воздействия высокоэнтальпийного плазменного потока на теплозащитный материал [3, 4]. При этом необходимо иметь надежный генератор низкотемпературной плазмы (ГНП), в разрядном промежутке которого создается высокоэнтальпийный воздушный плазменный поток со среднемассовой температурой до десятков тысяч градусов, что представляет несомненный интерес для исследования теплофизических, электродинамических и оптических свойств газов, а также для осуществления различных плазмохимических реакций.

Методика эксперимента и результаты

В качестве источника плазмы был разработан ГНП с вихревой стабилизацией и расширяющимся каналом выходного электрода (рис. 1), обеспечивающий высокие расходные характеристики и ресурс плазмотрона, эффективный нагрев рабочей среды и малые тепловые потери в водоохлаждаемые части ГНП. Выбор в пользу данной конструкции плазмотрона связан с тем, что обеспечивается горение дуги в ламинарном потоке при достаточно большой скорости газа на входе, распределение электрического тока, соответственно и магнитного поля, по поверхности электрода, что способствует повышению устойчивости положительного столба дуги [5]. При этом длина дуги уменьшается, тепловые потоки в стенки становятся более равномерными.

Рис. 1. Конструкция плазмотрона: 1 – сопло, 2 – корпус, 3 – анодная вставка, 4 – изолятор, 5 – катод, 6 – вставка из тугоплавкого материала, 7 – катододержатель, 8 – трубка охлаждения катода

При профилировании газоразрядного тракта и выходного сопла необходимо учитывать явления, связанные с высокоскоростными потоками (ударные волны и скачки уплотнения), и множество молекулярных реакций, в том числе диссоциацию и ионизацию, процессы взаимодействия излучения с веществом и его влияния на процессы теплопереноса, а также плазменную турбулентность [6]. На основе методики итерационно-

го профилирования сопла был спрофилирован выходной электрод с углом расхождения 12° и входным диаметром 4 мм. Для повышения КПД и тем самым уменьшения тепловых потерь в конструкции плазмотрона предусмотрено совмещение анода с соплом, благодаря чему плазмотрон постоянного тока с расширяющимся анодным каналом обеспечивает формирование на выходе плазмотрона в атмосферу слабо расходящейся ($2\alpha = 12^\circ$) азотной или воздушной плазменной струи диаметром $D = 10 \div 12$ мм с энтальпией $16 \div 40$ кДж/г (при полной электрической мощности дугового разряда $20 \div 50$ кВт, расходе плазмообразующего газа $1.0 \div 2.0$ г/с и среднемассовой температуре плазмы на выходе $8000 \div 11000$ К).

Основной характеристикой разряда в ГНП является вольт-амперная характеристика (ВАХ). Падающий характер ВАХ для ГНП с продольным потоком газа и самоустанавливающейся длиной дуги влечет за собой жесткие требования к источнику электрического питания для стабилизации дуги, кроме этого, с увеличением тока напряжение горения дуги падает, соответственно для достижения необходимой мощности дуги необходимо увеличивать ток, что уменьшает ресурс ГНП [7–9]. На рис. 2 приведена ВАХ разработанного ГНП, из которой видно, что ВАХ имеет практически не меняющееся с увеличением силы тока напряжение горения дуги.

Рис. 2. Вольт-амперные характеристики разряда воздуха

Для оценки КПД плазмотрона были определены тепловые потоки в водоохлаждаемые части плазмотрона по результатам измерения расходов и температуры воды на входах и выходах основных узлов ГНП. КПД плазмотрона составил $\sim 80\%$.

В работе также выполнены и калориметрические измерения тепловых потоков, отводимых водой при охлаждении медного цилиндрического торца калориметра (табл. 1). С помощью калориметра (водоохлаждаемый торец медного цилиндра диамет-

ром $d_0 = 20$ мм с расположенным в плоскости торца «охранным» диском, обеспечивающим «неразрывность» набегающего плазменного потока) в «установившемся» режиме теплообмена «струя-калориметр» выполнены калибровочные измерения тепловой мощности $W_Q = C_p q_{H_2O} (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}})$, сообщаемой плазменным потоком поверхности $S_{\text{кал}} = \pi d_0^2/4$ при варьируемых значениях мощности дуги, расхода газа и расстояния h от среза сопла плазмотрона до поверхности образца. При изменении мощности плазмотрона от 20 до 50 кВт и расстояния h от 10 до 30 мм плазменная струя при нормальном ее падении на калориметр обеспечивала удельные тепловые потоки от 0.1 до 10 кВт/см².

Таблица 1. Результаты калориметрических измерений плазмы воздуха

Плазма воздуха (расход – 1.5 г/с)					
	I, А	U, В	T _{вх} , °С	T _{вых} , °С	Q, кВт
h = 30 мм	150	132	12.2	16.2	2.1
	200	117		15.9	1.9
	250	107		15.7	1.8
	300	100		16.2	2.1
h = 25 мм	150	124/136	12	15.8	2.2
	200	118		16.5	2.5
h = 20 мм	150	130	12	16.5	2.6
	200	115		18.1	3.2
h = 15 мм	150	127	12	18	3.1
	200	115		18.3	3.3

Скорость плазменного потока определялась измерением полного давления с помощью трубки Пито [6]. Измерения показали, что в зависимости от начальных условий на расстоянии 0÷30 мм от среза сопла скорость потока плазмы меняется в пределах 990÷300 м/с.

Для определения плазмохимического состава и параметров потока высокоэнтальпийной плазмы применялись спектральные методы [10–13] с использованием трехканального оптоволоконного спектрометра AvaSpec 2048 со спектральным разрешением 0.2÷0.5 нм, который выполнял мониторинг излучения (с периодичностью 3÷4 спектр/с) вдоль оси потока плазмы в спектральном диапазоне 240÷1000 нм. Примеры характерных спектров воздуха представлены на рис. 3.

Рис. 3. Характерные спектры излучения плазмы воздуха (ток дуги 150 А)

Переносные и излучательные свойства низкотемпературной электродуговой плазмы азота и воздуха при атмосферном давлении детально исследованы экспериментально и теоретически [9, 10, 14]. При степени ионизации более $10^{-2} \%$ к такой плазме применимы приближение частичного локального термодинамического равновесия [12, 13], позволяющее использовать закон Больцмана при анализе относительных заселенностей возбужденных состояний излучающих атомов, и формула Саха с электронной температурой при анализе ионизационного состава плазмы. Наличие в исследуемых спектрах плазмы воздуха большого числа линий атомарного азота NI и кислорода OI позволяет использовать метод «больцмановской экспоненты» для определения T_e [15]. Концентрацию электронов в приосевой области плазменной струи можно оценить по полуширине линий H_α и H_β , которые позже сравнивались с уширением линий из работ Конжевика [16]. Так, например, на срезе сопла при силе тока 150 А и расходе воздуха 1.5 г/с температура и концентрация электронов в приосевой плазме $T_e = 8$ кК, $n_e = 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Заключение

Для моделирования процессов взаимодействия плазмы воздуха с поверхностью теплозащитных материалов разработан высокоресурсный ГНП постоянного тока с расширяющимся каналом выходного электрода, обладающий высоким КПД и стабильностью работы в широком диапазоне изменения силы тока и расхода плазмообразующего газа.

Работа выполнена в рамках Госзадания ОИВТ РАН по направлению 15 «Исследование электрофизических и тепловых процессов в многофазных и реагирующих средах». ГР01201357834 и при частичной поддержке грантов РФФИ № 16-08-00245 и 17-08-00127.

Литература

1. Гаджиев М.Х., Тюфтяев А.С., Саргсян М.А., Демиров Н.А., Щербаков В.В. Диагностический комплекс для исследования взаимодействия плазменной струи с термостойкими материалами // Вестник Дагестанского государственного университета. Сер.: Естественные науки. – 2016. – Т. 31, вып. 1. – С. 22–27.
2. Ageev A.G., Kavyrshin D.I., Sargsyan M.A., Gadzhiev M.Kh., Chinnov V.F. Determination of graphite sublimation rate in high enthalpy plasma flow using ‘laser knife’ method // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 107. – P. 146–153.
3. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. – М., Энергия, 1976. – 392 с.
4. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Теплообмен, термохимическое и термоэрозийное разрушение тепловой защиты. – М.: Янус-К, 2011. – 520 с.
5. Исакаев Э.Х., Синкевич О.А., Тюфтяев А.С., Чиннов В.Ф. Исследование генератора низкотемпературной плазмы с расширяющимся каналом выходного электрода и некоторые его применения // ТВТ. – 2010. – Т. 48, № 1. – С. 105–134.
6. Gadzhiev M. Kh., Kulikov Y.M., Panov V.A., Son E.E. and Tyufityaev A.S. Supersonic Plasmatron Nozzle Profiling with the Real Properties of High Temperature Working Gas // High Temperature. – 2016. – Vol. 54, № 1 – P. 38–45.
7. Глебов И.А., Рутберг Ф.Г. Мощные генераторы плазмы. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 264 с.

8. Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н., Михайлов Б.И., Десятков Г.А. Электродуговые генераторы термической плазмы. Низкотемпературная плазма. Т. 17. – Новосибирск: Наука, 1999. – 712 с.
9. Асиновский Э.И., Кириллин А.В., Низовский В.Л. Стабилизированные электрические дуги и их применение в теплофизическом эксперименте. – М.: Физматлит, 2008. – 264 с.
10. Авилова И.В., Биберман Л.М. и др. Оптические свойства горячего воздуха. – М.: Наука, 1970. – 320 с.
11. Суржииков С.Т. Оптические свойства газов и плазмы. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 576 с.
12. Очкин В.Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. – М.: Наука, 2006. – 472 с.
13. Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. – М.: Наука, 1982. – 379 с.
14. Низкотемпературная плазма / под ред. Энгельшта В.С., Урюкова Б.А. Т. 1. Теория столба электрической дуги. – Новосибирск: Наука, 1990. – 375 с.
15. Методы исследования плазмы / под ред. В. Лохте-Хольтгревена. – М.: Мир, 1971. – 552 с.
16. Konjevic N., Lesage A., Fuhr J.R. and Wise W.L. Experimental Stark Widths and Shifts for Spectral Lines of Neutral and Ionized Atoms // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 2002. – Vol. 31, № 3.

Поступила в редакцию 28 февраля 2018 г.

UDK 533.9.07

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-1-50-56

Low-temperature plasma generator for investigation of plasma jet with heat-resistant materials

M.Kh. Gadzhiev, A.S. Tyufyayev, E.Kh. Isakaev, N.A. Demirov

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences (JIHT); Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya st., 13, Bd. 2; makhach@mail.ru

High-enthalpy swirl-stabilized divergent-duct DC air plasma torch has been developed to study the thermal and electro-optical properties of hot reacting gases and plasma and also for refractory materials testing. To increase the efficiency and thereby reduce the heat losses in the water-cooled parts it is provided to combine the anode with the nozzle, which allowed to increase the efficiency of the plasma torch up to 80 %. The current-voltage characteristic appears to be unchangeable with increasing current strength, unlike the cylindrical channel plasma torches where the current-voltage characteristic is predominantly recessive. The former allows to increase electrodes lifetime and to reduce the requirements for power supply arc-stabilizing control systems. Electrical, calorimetric and spectral methods have shown the low-temperature plasma generator providing the following gas properties in the outlet portion: the jet divergence angle of $2\alpha = 12^\circ$, the jet diameter of 10÷12 mm, the enthalpy of 16÷40 kJ/g, the average mass temperature of 8÷11 kK. At electric arc discharge power of 20÷50 kW and a plasma-forming gas flow rate of 1÷2 g/s the measured electron concentration reaches approximately $n_e \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Depending on the initial conditions the plasma flow velocity varies from 990 to 300 m/s with distance being varied in the range of 0÷30 mm from the nozzle outlet.

Keywords: *low-temperature plasma generators, plasma torch, current–voltage characteristic, spectroscopy.*

Received 28 January, 2018