ФИЗИКА

УДК 533.9.07

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-2-22-27

Ю.М. Куликов, М.Х. Гаджиев, А.С. Тюфтяев

Профилирование сверхзвукового сопла для генератора низкотемпературной плазмы постоянного тока с расширяющимся каналом выходного электрода

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Объединенный институт высоких температур РАН»; Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2; kulikov-yurii@yandex.ru

Представлены результаты применения методики итерационного профилирования сверхзвукового сопла для генератора низкотемпературной плазмы постоянного тока с расширяющимся каналом выходного электрода мощностью до 50 кВт с учетом немонотонной зависимости показателя адиабаты от температуры на основе расхода газа в критическом сечении и параметров газа в форкамере. Проверка применимости методики проведена с помощью коммерческих пакетов вычислительной гидродинамики, а также на основе лабораторных экспериментов. Последние показали эффективность спрофилированного сопла в широком диапазоне изменения тока и расхода газа. Так, при токе дуги 200 А и расходе газа 1.5 г/с скорость плазмы на срезе составляет 1500 м/с с температурой 5÷6 кК. В результате анализа вольт-амперных характеристик генератора низкотемпературной плазмы, оснащенного сверхзвуковым насадком, установлено, что напряжение горения дуги со сверхзвуковым соплом ниже, чем для открытого расширяющегося канала газоразрядного тракта, что связано с повышением проводимости газа в разрядном промежутке при высоком давлении.

Ключевые слова: *генератор низкотемпературной плазмы, плазмотрон, ВАХ, профилирование, сверхзвуковое сопло.*

Введение

Науке и технике требуется создание генератора низкотемпературной плазмы (ГНП) различного применения с определенными характеристиками потоков плазмы на срезе сопла [1–4]. Для ряда задач, в частности для исследования сублимации теплозащитных материалов [5, 6], необходимо преобразование дозвукового плазменного потока в сверхзвуковой. Эмпирический подбор необходимых параметров – весьма кропотливая задача, поэтому профилирование газоразрядного тракта и профиля сверхзвуковой насадки является актуальным для науки и техники.

Детальное численное моделирование задач истечения струй плазмы в открытое пространство – достаточно сложная задача, что обусловлено необходимостью учета явлений, связанных с высокоскоростными потоками (ударные волны и скачки уплотнения) и значительного числа молекулярных реакций, в том числе диссоциации и ионизации [7], процессов взаимодействия излучения с веществом, его влияния на теплоперенос, а также плазменной турбулентности.

При разработке сверхзвукового сопла для плазмотрона с расширяющимся каналом выходного электрода мощностью до 50 кВт [8], использующего в качестве рабоче-

го тела азот, применялась методика итерационного профилирования сопла ГНП в одномерном приближении, подробно описанная в работах [8, 9] и позволяющая учесть немонотонность показателя адиабаты газовой смеси (N_2 , N , N^+). В качестве начальных параметров используются: интегральный расход газа G , универсальная газовая постоянная R , давление в форкамере P_1 , температура в форкамере T_1 , диаметр сопла на выходе D_1 , число Маха M_v . На первом этапе находится молярная масса, скорость звука во входном сечении, число Маха во входном сечении, а также соответствующее значение энтальпии H . На втором этапе находится энтальпия заторможенного потока:

$$H_{T_0} = H_{T_1} + \frac{1}{2} \left(\frac{GRT_1}{F_1 \mu_{T_1} P_1} \right)^2,$$

наряду с ближайшим значением скорости для $H_{T_0} - T_0$; теплоемкость при температуре торможения:

$$C_p = \left(\frac{dH}{dT} \right)_{T_0} = \frac{H_{T_0+dT} - H_{T_0-dT}}{2dT},$$

а также само её значение

$$T_0 = T_1 - \frac{H_{T_1} - H_{T_0}}{C_p(T_0)}.$$

По уравнению адиабаты с учетом локальных значений показателя адиабаты находят давление и плотность в точке торможения. Параметры газового потока в критическом и выходном сечении определяются путем нахождения минимума функции в дискретном пространстве заранее найденных значений:

$$\Delta = \frac{2}{M^2} (H_{T_0} - H(T)) \mu(T) - k(T) \cdot RT$$

Параметры газового потока и диаметра сопла находим с помощью этой же функции в предположении о линейности числа Маха. В частности, было произведено профилирование сопла для следующих параметров: $G = 1.5$ г/с, $R = 8.31$ Дж/моль·К, $P_1 = 405\,300$ Па, $T_1 = 10$ кК, $D_1 = 0.049$ м, $M_v = 4$. Результат профилирования сопла представлен на рис. 1 в сравнении со «стандартным» методом и расчетами по работе [11].

Сверхзвуковое сопло на $M = 1.75$ (полное давление $P_0 = 5$ атм, температура на входе $T_1 = 10$ кК, расход $G = 1.8$ г/с, диаметр входного сечения $D_1 = 9$ мм, диаметр критического сечения $D_c = 3$ мм, диаметр выходного сечения $D_v = 3$ мм) для рабочей среды молекулярного азота и его производных представлено на рис. 2. Проверка применимости методики итерационного профилирования сопла была проведена с помощью пакета вычислительной гидродинамики FlowVision [14]. Расчет проводился для сферически симметричного случая, область представляла собой сектор раствором в 1 угловой градус, ставились граничные условия в виде прилипания, дозвукового входа, симметрии и свободного выхода. Давление и температура задавались относительно 10 К и 1 атм. Общее число расчетных ячеек составляло 223 774. Как показывают расчеты, в коническом сопле происходит отрыв потока и образуется периодическая система косых скачков (рис. 3), благодаря чему течение остается сверхзвуковым на расстоянии нескольких калибров от среза сопла.

Рис. 1. Зависимость диаметра сопла от числа Маха при $T_1 = 10$ кК

Рис. 2. Насадка на плазмотрон с сверхзвуковым соплом:

- 1 – плазмотрон;
- 2 – крепежное устройство;
- 3 – корпус сверхзвукового сопла;
- 4 – сверхзвуковое сопло

Рис. 3. Картина распределения числа Маха при $t = 0.0034348$ с

Экспериментальное исследование электрических и оптических (спектральных) характеристик [8] ГНП со сверхзвуковым соплом показало эффективность спрофилированного сопла в широком диапазоне изменения тока и расхода газа. Так, при токе дуги 200 А и расходе газа 1.5 г/с скорость на срезе составляет 1500 м/с с температурой $5 \div 6$ кК.

Для любого ГНП важной является его вольт-амперная характеристика (ВАХ). На рис. 4 приведена ВАХ плазмотрона [8] с насадкой из сверхзвукового сопла и без него для рабочего газа азота расходом 1.5 г/с, из которой видно, что напряжение горения дуги со сверхзвуковым соплом ниже, чем для открытого расширяющегося канала газоразрядного тракта, что связано с повышением проводимости газа при высоком давлении [12, 13].

Рис. 4. Вольт-амперные характеристики ГНП без насадки (1) и со сверхзвуковой насадкой (2) для расхода плазмообразующего газа азота – 1.5 г/с

Заключение

Экспериментальные и теоретические исследования с помощью пакета вычислительной гидродинамики FlowVision показали применимость методики итерационного профилирования сопла для создания сверхзвуковых насадок для ГНП постоянного тока с расширяющимся каналом выходного электрода мощностью до 50 кВт.

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. Глебов И.А., Рутберг Ф.Г. Мощные генераторы плазмы. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 264 с.
2. Коротеев А.С., Миронов В.М., Свирчук Ю.С. Плазмотроны: конструкция, характеристики, расчет. – М.: Машиностроение, 1993. – 296 с.
3. 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.
4. Асиновский Э.И., Кириллин А.В., Низовский В.Л. Стабилизированные электрические дуги и их применение в теплофизическом эксперименте. – М.: Физматлит, 2008. – 264 с.
5. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976. – 392 с.
6. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Теплообмен, термохимическое и термоэрозионное разрушение тепловой защиты. – М.: Янус-К, 2011. – 520 с.
7. Capitelli M., Colonna G., D'Angola A. Fundamental Aspects of Plasma Chemical Physics // Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics. – 2012. – Vol. 66. – 310 p.
8. Гаджиев М.Х., Тюфтяев А.С., Исакаев Э.Х., Демиров Н.А. Генератор низкотемпературной воздушной плазмы для исследования взаимодействия плазменной струи с термостойкими материалами // Вестник Дагестанского государственного университета. Сер. 1: Естественные науки. – 2018. – Т. 33, вып. 1. – С. 50–57.
9. Gadzhiev M.Kh., Kulikov Y.M., Panov V.A., Son E.E., and Tyufityaev A.S. Supersonic nozzle profiling for supersonic aerospace testing in a view of high-temperature of properties of real gases // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – 653 (1) 012071. November, 2015.
10. 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.
11. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Т. 1. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1991. – 600 с.
12. Murphy A.B. and Arundelli C.J. Transport coefficients of argon, nitrogen, oxygen, argon-nitrogen, and argon-oxygen plasmas // Plasma Chem. Plasma Process. – 1994. – № 14. – P. 451–490.
13. Asinovsky E.I., Kirillin A.V., Pakhomov E.P. and Shabashov V.I. Experimental investigation of transport properties of low-temperature plasma by means of electric arc // Proc. IEEE. – 1971. – № 59 – P. 592–601.

14. FlowVision. Руководство пользователя. – М.: ООО «ТЕСИС», 2016. – 264 с.

Поступила в редакцию 15 февраля 2018 г.

UDC 533.9.07

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-2-22-27

Supersonic nozzle profiling for a DC low-temperature plasma generator with an expanding duct of the output electrode

Yu.M. Kulikov, M.Kh. Gadzhiev, A.S. Tyuftyaev

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

In the present paper we present the results on the iterative supersonic nozzle profiling method for a DC plasma torch possessing an output electrode expanding channel with a power of up to 50 kW, taking into account the nonmonotonic dependence of the adiabatic exponent on temperature on the basis of the gas flow rate in the critical section and the gas parameters in the prechamber. The methodology was verified both using CFD commercial packages and laboratory experiments. The latter showed the efficiency of a profiled nozzle over a wide range of currents and gas flow rates, for example, at an arc current of 200 A and a gas flow rate of 1.5 g/s, the shear rate is 1500 m/s and the temperature is 5÷6 kK. When analyzing current-voltage characteristics of the plasma torch equipped with a supersonic nozzle it was found that the supersonic nozzle arc burning voltage is lower than for an open divergent duct that is associated with an increase in the gas conductivity at high pressure.

Keywords: low-temperature plasma generator, plasma torch, current–voltage characteristics, profiling, supersonic nozzle.

Received 15 February, 2018