

УДК 533.17

Моделирование течения холодного плазмообразующего газа в цилиндрических каналах высоковольтных плазмотронов переменного тока

А.М. Боровской

Свойства электрических дуг, горящих в цилиндрических каналах плазмотронов (генераторов низкотемпературной плазмы), ещё полностью не изучены, поэтому в процессе исследования было промоделировано течение воздуха в областях тангенциальной подачи, в цилиндрическом канале, в сужающемся сопле или в смесительной камере плазмотронов и за их пределами (в окружающей среде). В итоге, было выполнено 3D-моделирование течения холодного плазмообразующего газа для исследуемых высоковольтных плазмотронов переменного тока со стержневыми электродами в цилиндрических каналах.

PACS: 47.55.Ca

Ключевые слова: плазмотроны переменного тока, течение плазмообразующего рабочего газа, 3D-моделирование.

Введение

От организации подачи плазмообразующих рабочих газов и от их взаимодействия с электрическими дугами зависят физические параметры генераторов низкотемпературной плазмы, т.е. плазмотронов. В Институте электрофизики и электроэнергетики Российской Академии Наук (ИЭЭ РАН) был проведен ряд исследований [1–6], включая последние расчётно-теоретические [5] и последние экспериментальные исследования [6], в результате которых были определены внешние характеристики высоковольтных плазмотронов переменного тока мощностью до 50 кВт со стержневыми электродами, установленными в цилиндрических каналах, и физические параметры в их факелах.

В последние десятилетия и в других научно-исследовательских учреждениях также проводились подобные научные исследования [7–12], в результате которых тоже предпринимались попытки определения внешних характеристик плазмотронов и физических параметров в их факелах. Однако высоковольтные плазмотроны переменного тока, разработанные в ИЭЭ РАН, отличаются от других тем, что их внешний диаметр равен диаметру канала, а стенка канала не является рабочей поверхностью электрода. Существенными при этом на сегодняшний день являются вопросы эффективности высоковольтных плазмотронов переменного тока, а именно, их надёжность, устойчивость, обеспечение длительного срока непрерывной работы и особенно управление этими процессами [11]. Другими словами, сохраняют свою актуальность вопросы тщательного исследования течения холодного плазмообразующего газа, двигающегося в каналах высоковольтных плазмотронов с дозвуковой скоростью, для решения которых необходимы

экспериментальные исследования, направленные на детальное изучение физико-химических процессов и на выявление роли газодинамических и кинетических параметров с целью построения физико-математических моделей, адекватно описывающих наблюдаемые явления. Также необходимо научное обоснование и применение экспериментальных методов изучения тонкой структуры реагирующих течений, обеспечивающих получение достоверной информации о развитии процесса протекания холодного газового потока в цилиндрических каналах высоковольтных плазмотронов переменного тока с газовой стабилизацией электрической дуги.

Из сказанного вытекает, что свойства электрических дуг, горящих в цилиндрических каналах плазмотронов (генераторов низкотемпературной плазмы), ещё далеко полностью не изучены. Поэтому целью данной работы было моделирование течения воздуха в областях тангенциальной подачи, в цилиндрическом канале, в сужающемся сопле или в смесительной камере плазмотронов и за их пределами (в окружающей среде). При этом за основу исследований принято 3D-моделирование течения холодного плазмообразующего газа для исследуемых высоковольтных плазмотронов переменного тока со стержневыми электродами в цилиндрических каналах.

Моделирование течения холодного плазмообразующего газа

Объектами данного исследования являлись высоковольтные плазмотроны переменного тока, а именно, однофазный двухканальный и трёхфазный трёхканальный, которые отличаются конструктивно. Так, двухканальный плазмотрон имеет сужающуюся сопловую камеру, а трёхканальный – смесительную камеру постоянного диаметра, причём у этих плазмотронов идентичные электродные узлы, но с разными размерами каналов. Заметим, что стержневой электрод, входящий в электродные узлы этих плазмотронов, выполнен в форме тела вращения и имеет общую ось с каналом, в котором он устанавливается (рис. 1).

Боровской Алексей Михайлович, инженер-исследователь.

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18.
Тел.: +7 (812) 5716293. E-mail: borovskoi.alex@mail.ru

Статья поступила в редакцию 1 марта 2014 г.

© Боровской А.М., 2014



Рис. 1. Высоковольтные плазмотроны переменного тока с электродными узлами.

С целью моделирования процессов течения плазмообразующего рабочего газа была построена сетка расчётной области с помощью программы GAMBIT, а также при моделировании применялась программа FLUENT с использованием модели турбулентности Spalart-Allmaras для расчётов течения плазмообра-

зующего рабочего газового потока; причём плотность плазмообразующего рабочего газа, т.е. воздуха, в этих расчётах определялась по формуле идеального газа, а его вязкость – по формуле Сатерленда с тремя коэффициентами; удельная теплоёмкость, коэффициент теплопроводности и молярная масса этого плазмо-

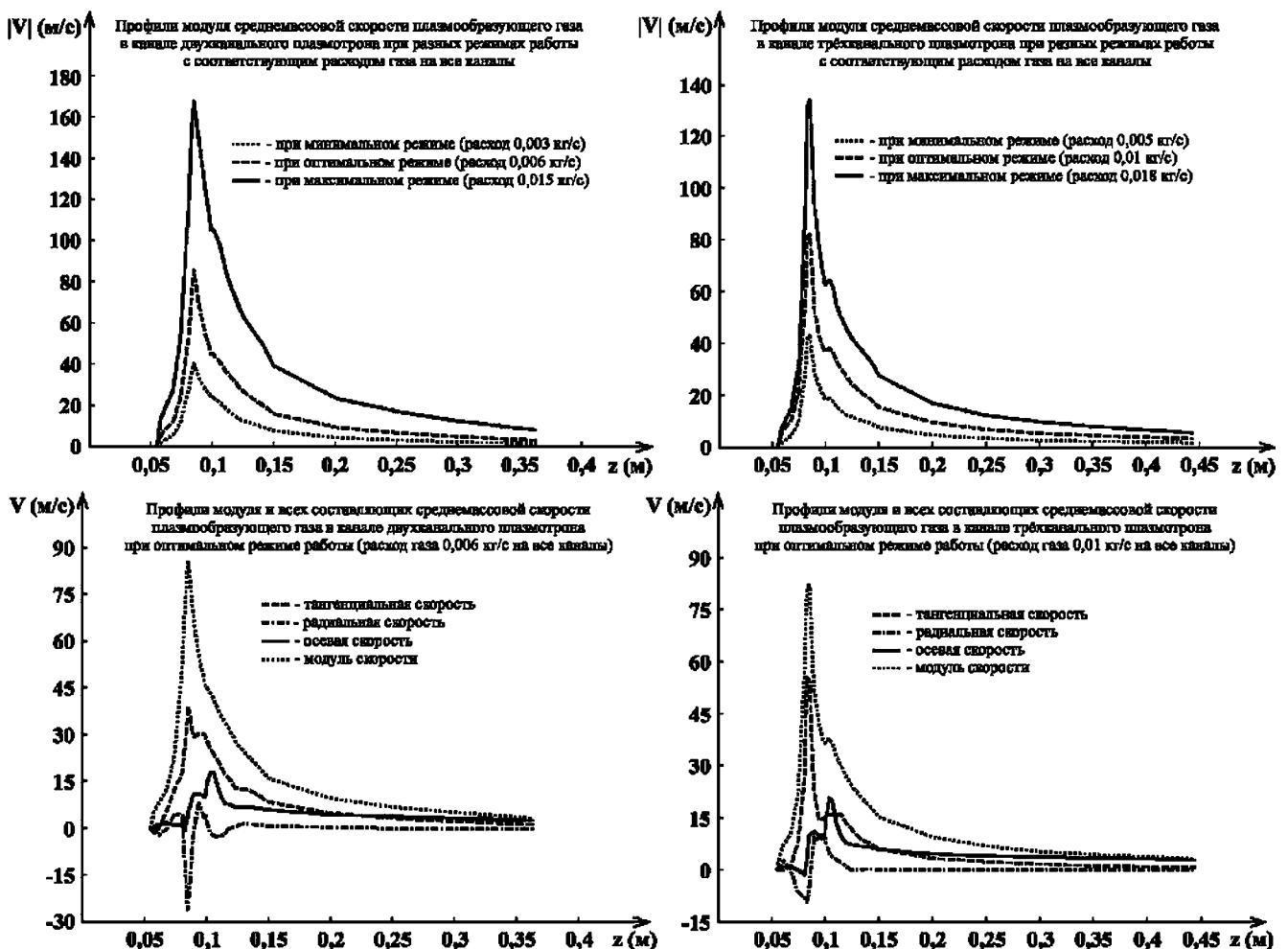


Рис. 2. Профили среднemasовых скоростей рабочего газа в каналах плазмотронов.

образующего рабочего газа были приняты как постоянные величины. В качестве граничных условий был задан массовый расход плазмообразующего рабочего газа в сечениях входных отверстий тангенциальной подачи, объединённых в одну поверхность. Внешняя сетка программы GAMBIT учитывала, что возвратные течения задавались на поверхностях окружаю-

щей среды при температуре 293,15 К и нормальном атмосферном давлении, т.е. при 101,325 кПа. Также было промоделировано течение воздуха в областях тангенциальной подачи, в цилиндрическом канале, в сужающемся сопле и в смешительной камере исследуемых плазмотронов и за их пределами, другими словами, в окружающей среде.

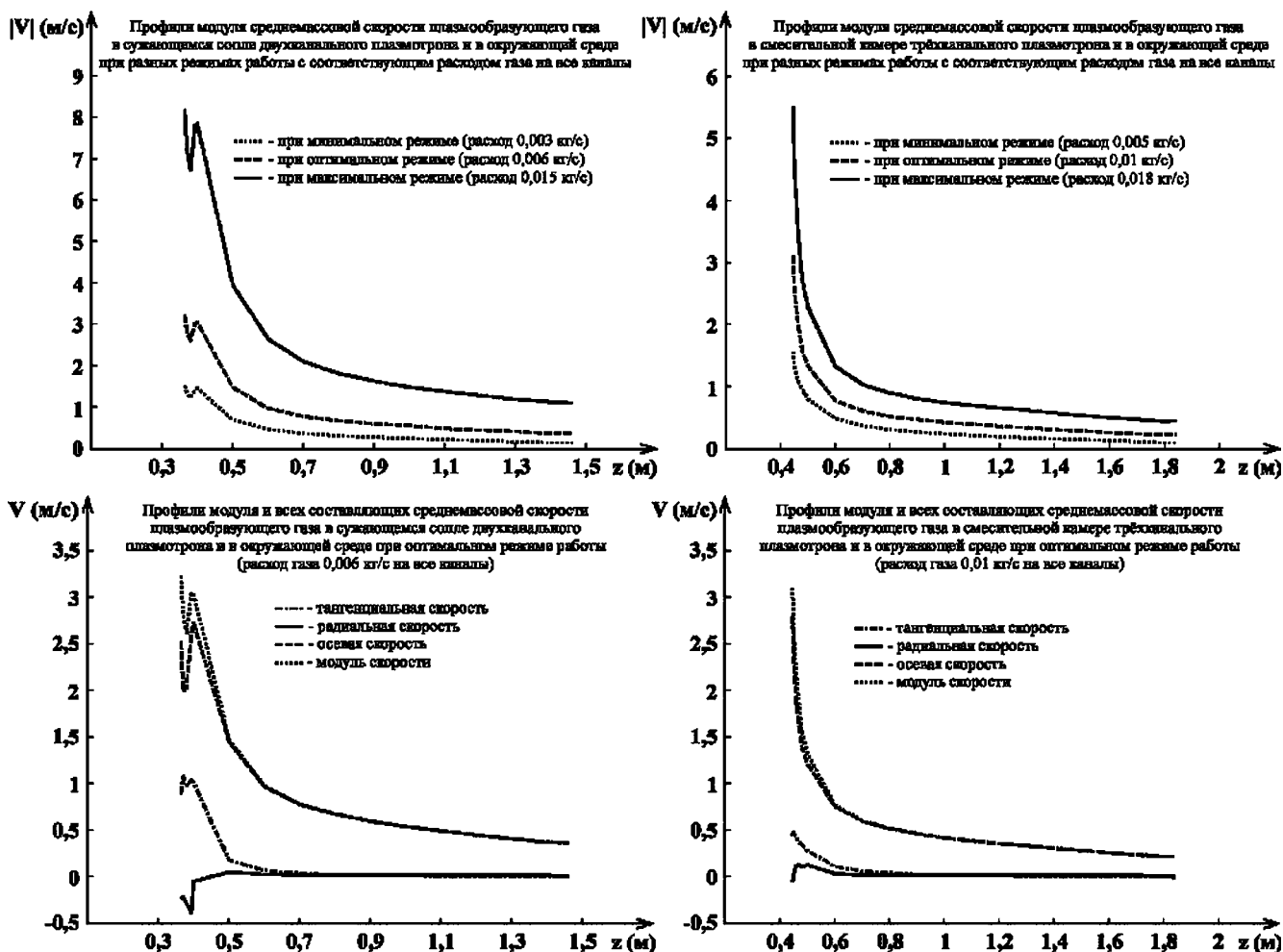


Рис. 3. Профили среднemasовых скоростей рабочего газа в сужающемся сопле, в смешительной камере плазмотронов и в окружающей среде.

В разных локальных областях исследуемых плазмотронов и за их пределами для тщательного глубокого исследования физических процессов холодного продува производилось построение полей скоростей плазмообразующей рабочей газовой струи: модуля скорости, а также тангенциальной, радиальной и осевой составляющих скорости плазмообразующей рабочей газовой струи в различных сечениях по продольной координате. Были рассчитаны среднemasовые скорости плазмообразующего рабочего газа и построены их зависимости от продольной координаты, т.е. профили среднemasовых скоростей плазмообразующего рабочего газа (см. рис. 2 и 3).

Основные результаты исследований представлены в таблице.

Полученные результаты данного исследования показали, что существенное снижение среднemasового модуля скорости течения плазмообразующей рабочей газовой струи обнаруживается в каналах исследуемых плазмотронов по мере приближения к выходу из канала и снаружи (в окружающей среде), т.е. либо от сужающегося сопла двухканального, либо от смешительной камеры трёхканального плазмотронов. В данном исследовании при моделировании было также выявлено, что тангенциальная составляющая среднemasовой скорости плазмообразующей рабочей струи прекращает вносить

Таблица

Итоговые результаты моделирования

Параметры плазмообразующего газа	Однофазный двухканальный плазмотрон			Трёхфазный трёхканальный плазмотрон		
Q_m – массовый расход газа, кг/с	0,003 – 0,015			0,005 – 0,018		
Условия течения газа	При нагреве газа от эл. дуги с учётом о.п.т.п.	При нагреве газа от эл. дуги без учёта о.п.т.п.	При холодном продуве	При нагреве газа от эл. дуги с учётом о.п.т.п.	При нагреве газа от эл. дуги без учёта о.п.т.п.	При холодном продуве
V_{maxl} – max модуль скорости газа в сечении канала, близком к тангенциальному вдуву, м/с	42,9 – 166,2	42,9 – 167,7	40,2 – 167,5	44,1 – 135,2	44,1 – 135,2	42,9 – 134
V_t – среднемассовая тангенциальная составляющая скорости газа в сечении канала, близком к тангенциальному вдуву, м/с	17,6 – 68,8	17,6 – 70,2	15 – 62,7	30,2 – 88,8	30,2 – 88,8	29,6 – 90,2
$V_{min\ вых}$ – min модуль скорости газа в выходном сечении канала, м/с	6,5 – 13,5	6,5 – 13,9	1,5 – 8,4	8,7 – 19,9	8,7 – 19,9	1,6 – 5,5
$V_z\ вых$ – среднемассовая осевая составляющая скорости газа в выходном сечении канала, м/с	6,4 – 13,3	6,4 – 13,7	1,2 – 6,2	8,7 – 19,8	8,7 – 19,8	1,4 – 4,9
$V_{max\ сопл., см.к.}$ – max модуль среднемассовой скорости газа в окружающей среде рядом с выходным сечением сужающегося сопла двухканального плазмотрона (при холодном продуве – в начальном сечении сужающегося сопла двухканального плазмотрона) и в начальном сечении смесительной камеры трёхканального плазмотрона, м/с	7,5 – 16,4	7,5 – 18,5	1,5 – 8,2	9,2 – 30,3	9,2 – 20,8	1,6 – 5,5
$V_z\ сопл., см.к.}$ – среднемассовая осевая составляющая скорости газа в окружающей среде рядом с выходным сечением сужающегося сопла двухканального плазмотрона (при холодном продуве – в начальном сечении сужающегося сопла двухканального плазмотрона) и в начальном сечении смесительной камеры трёхканального плазмотрона, м/с	7,4 – 16	7,4 – 18,2	1,2 – 6,3	9,2 – 30,1	9,2 – 20,8	1,4 – 4,9

наибольший вклад в модуль среднемассовой скорости плазмообразующего рабочего газа в сечении канала исследуемых плазмотронов вблизи наконечника электродов, а за пределами электродов внутри исследуемых плазмотронов и в окружающей среде наибольший вклад в модуль среднемассовой скорости плазмообразующего рабочего газа вносит уже его осевая составляющая (см. рис. 2 и 3). Однако среднемассовая тангенциальная скорость плазмообразующего рабочего газа при этом не равна нулю, и

поэтому электрическая дуга не контактирует со стенками каналов исследуемых высоковольтных плазмотронов переменного тока с газовихревой стабилизацией дуги со стержневыми электродами, а также с сужающимся соплом двухканального и со смесительной камерой трёхканального исследуемых плазмотронов. Все это позволяет обеспечить дополнительную защиту не только сужающимся соплам и смесительным камерам, но и всему корпусу исследуемых плазмотронов от разрушения.

Заключение

Результаты моделирования позволили рассчитать поля газодинамических параметров течения холодного плазмообразующего рабочего газа, то есть воздуха, в цилиндрических каналах, за срезом сужающегося сопла и смесительной камеры исследуемых высоковольтных плазмотронов переменного тока с газовихревой стабилизацией дуги со стержневыми электродами. При этом были построены профили среднемассовых скоростей плазмообразующей рабочей воздушной струи; впервые было выполнено 3D-моделирование течения холодного плазмообразующего газа для исследуемых высоковольтных плазмотронов, что позволяет планировать дальнейшее усовершенствование модели с учётом горения электрической дуги в цилиндрических каналах исследуемых плазмотронов, а также выполнить численные расчёты параметров работающих высоковольтных плазмотронов переменного тока с газовихревой стабилизацией электрической дуги со стержневыми электродами. В дальнейшем для согласования расчётных моделей будут использоваться экспериментальные данные, полученные при испытании действующих образцов плазмотронов с варьированием расхода плазмообразующего рабочего газа и мощности этих плазмотронов.

Литература

1. Рутберг Ф.Г., Сафронов А.А., Попов С.Д. и др. // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44. № 2. С. 205.
2. Рутберг Ф.Г., Сафронов А.А., Наконечный Г.В. и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2007. № 9. Приложение. С. 77.
3. Никонов А.В., Овчинников Р.В., Павлов А.В. и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2008. Т. 51. № 11/3. С. 25.
4. Рутберг Ф.Г., Павлов А.В., Попов С.Д. и др. // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47. № 2. С. 193.
5. Попов С.Д., Серба Е.О., Суров А.В., Суров А.В. // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2012. № 5. С. 50.
6. Степанов Е.Ю., Долиновская Р.В., Шабалин С.А. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование». 2012. № 3. Часть 2, С. 110.
7. Жуков М.Ф., Аньшаков А.С., Лукашов В.П. и др. // Высокотемпературные течения и теплообмен. Сборник статей. Новосибирск. 1990. С. 3-46.
8. Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н. и др. // Низкотемпературная плазма. 1999. Т. 17. С. 712.
9. Жуков М.Ф. // Низкотемпературная плазма. 2004. Т. 20. С. 15.
10. Жовтыянский В.А. // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2009. № 4. С. 97.
11. Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Чередищенко В.С. и др. // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2012. № 5. С. 4.
12. Боровской А.М. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 4. С. 450.

Modelling of cold plasma-forming gas flow in the cylindrical channels of high-voltage AC plasma torches

A. M. Borovskoy

Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences (RAS)
18 Dvortsovaya emb., Saint-Petersburg, 191186, Russia
E-mail: borovskoi.alex@mail.ru

Received March 1, 2014

The properties of electric arc, burning in the cylindrical channels of plasma torches (thermal plasma generators), is not fully understood, therefore, an attempt of gas flow simulation in the tangential feed areas in the cylindrical channel, in the tapering nozzle chamber or in the mixing chamber of plasma torches and outside (in the environment) is made; thus, 3D-modelling of the cold plasma-forming gas flow in cylindrical channels for high-voltage AC plasma torches with rod electrodes is performed for the first time.

PACS: Gas-liquid flows, 47.55.Ca

Keywords: plasma torches AC, plasma-forming gas, gas flow, 3D-modelling.

References

1. F. G. Rutberg, A. A. Safronov, S. D. Popov, et al., High. Temp. **44**, 205 (2006).
2. F. G. Rutberg, A. A. Safronov, G. V. Nakonechnyi, et al., Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Fizika, No. 9, Appendix, 77 (2007).
3. A. V. Nikonov, R. V. Ovchinnikov, A. V. Pavlov, et al., Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Fizika, **51** (11/3), 25 (2008).
4. F. G. Rutberg, A. V. Pavlov, S. D. Popov, et al., High. Temp. **47**, 193 (2009).
5. S. D. Popov, E. O. Serba, A. V. Surov, et al., Energotekhnologii i Resursosberezhenie, No. 5, 50 (2012).
6. E. Yu. Stepanov, R. V. Dolinovskaya, S. A. Shablin, Vedom. SPb. Gos. Politekh. Univ. Seriya Nauka Obraz. No. 3. Part 2, 110 (2012).
7. M. F. Zhukov, A. S. An'shakov, V. P. Lukashov, et al., in *High-Temperature Flows and Heat Exchange*. Collected Articles. (Novosibirsk, 1990), pp. 3-46 [in Russian].
8. M. F. Zhukov, I. M. Zasypkin, A. N. Timoshevskii, et al., Nizkotemperaturnaya Plazma **17**, 712 (1999).
9. M. F. Zhulov, Nizkotemperaturnaya Plazma **20**, 15 (2004).
10. V. A. Zhovtyanskiy, Energotekhnologii i Resursosberezhenie, No. 4, 97 (2009).
11. A. S. An'shakov, E. K. Urbakh, V. S. Cherednichenko, et al., Energotekhnologii i Resursosberezhenie, No. 5, 4 (2012).
12. A. M. Borovskoy, Uspekhi Prikladnoi Fiziki **1**, 450 (2013).