

УДК 533.17

Моделирование течения газа с учётом нагрева в цилиндрических каналах высоковольтных плазмотронов переменного тока

А. М. Боровской

Характеристики плазмотронов зависят от организации подачи плазмообразующего газа и характера взаимодействия газового потока с электрическими дугами. Поэтому в процессе исследования было выполнено 3D-моделирование течения воздуха с учётом его нагрева от столба электрической дуги в областях тангенциальной подачи, в цилиндрическом канале, в сужающемся сопле и в смесительной камере исследуемых плазмотронов и за их пределами (в окружающей среде). При этом скорость газа, нагретого от дугового столба, на выходе из сужающегося сопла и из смесительной камеры в 2—6 раз больше скорости холодного газа.

PACS: 47.55.Ca

Ключевые слова: плазмотрон, течение плазмообразующего газа, нагрев газа от электродугового столба, 3D-моделирование.

Введение

Характеристики генераторов низкотемпературной плазмы (плазмотронов) зависят от организации подач плазмообразующих рабочих газов и от их взаимодействий с электрическими дугами. В последние десятилетия в ИЭЭ РАН были разработаны и испытаны высоковольтные плазмотроны переменного тока мощностью до 50 кВт, которые конструктивно отличаются от аналогичных плазмотронов, разработанных другими научно-исследовательскими учреждениями, т. к. их внешний диаметр равен диаметру канала и стенка канала не является рабочей поверхностью электрода [1—3]. При этом недавно проводились расчётно-теоретические [2] и экспериментальные исследования [3] не только в ИЭЭ РАН, но и в других научно-исследовательских учреждениях [4—8], в результате которых были определены внешние характеристики плазмотронов и физические параметры в их факелах [1], но свойства электрических дуг, горящих в цилиндрических каналах плазмотронов, полностью ещё не изучены, хотя и выполнен большой объём научно-исследовательской работы. Поэтому детальное изучение этих физико-химических процессов и их характеристик является актуальным и своевременным для дальнейшего эффективного усовершенствования и практического

применения исследуемых плазмотронов, т. к. их эффективность, надёжность, устойчивость, обеспечение длительного срока действия и управление этими процессами [8] являются важными инженерными и практическими задачами о дозвуковых газовых течениях. Их верное решение возможно только при обязательных экспериментальных исследованиях, направленных на изучение газодинамических и кинетических аспектов с целью построения адекватных физико-математических моделей.

В этой связи на данном этапе исследований была предпринята попытка смоделировать течение плазмообразующего газа (воздуха), подаваемого тангенциально для осевой стабилизации дугового столба в канале плазмотронов, причем с учётом его взаимодействия с нагретой этим столбом областью цилиндрического канала плазмотрона.

Высоковольтные плазмотроны с газовихревой стабилизацией электрической дуги

Объектами исследования при этом являлись высоковольтные плазмотроны переменного тока с газовихревой стабилизацией дуги: однофазный двухканальный и трёхфазный трёхканальный, имеющие одинаковые электродные узлы, но конструктивно отличающиеся длиной каналов и формой смесительной камеры. Двухканальный плазмотрон имеет сужающуюся сопловую камеру, а трёхканальный — смесительную камеру постоянного диаметра; причём стержневой электрод, входящий в электродные узлы этих плазмотронов, выполнен в форме тела вращения и имеет общую ось с каналом, в котором он устанавливается (см. рис. 1).

Боровской Алексей Михайлович, инженер-исследователь.
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18.
Тел. +7 (911) 247-13-35. E-mail: borovskoi.alex@mail.ru

Статья поступила в редакцию 2 сентября 2014 г.

© Боровской А. М., 2014

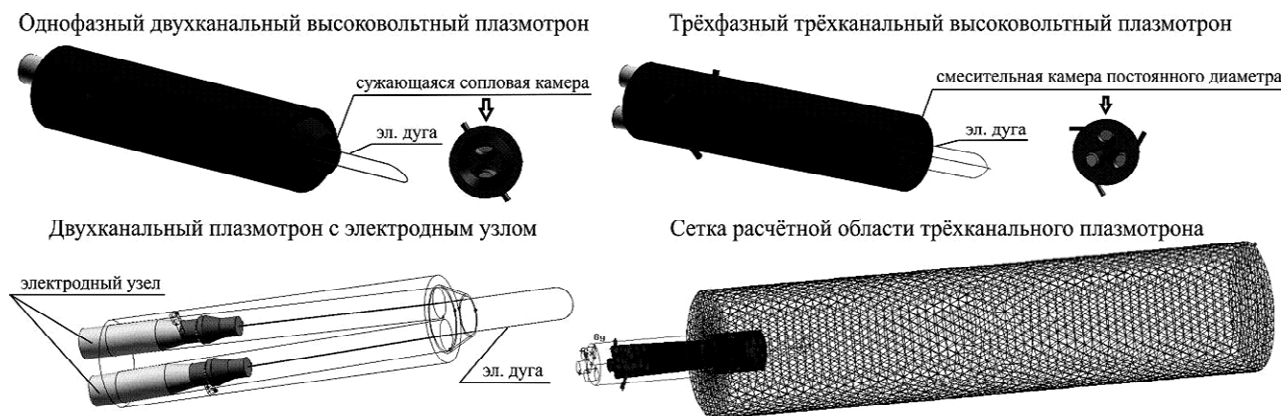


Рис. 1. Высоковольтные плазмотроны переменного тока с горящими электрическими дугами, с электродными узлами и с сеткой расчётной области

Моделирование течения газа с учётом его нагрева от столба электрической дуги

Для построения сетки расчётной области и моделирования течения плазмообразующего рабочего газа использовались программы GAMBIT и FLUENT с применением модели турбулентности Spalart-Allmarès. В расчётах плотность рабочего газа определялась по формуле идеального газа; вязкость, удельная теплоёмкость и теплопроводность – по кинетической теории; молярная масса принималась постоянной, а число степеней свободы — равным 5, т. к. основным компонентом воздуха является двухатомный азот. В сечениях входных отверстий тангенциальной подачи, объединённых в одну поверхность, задавались массовые расходы газа для разных режимов работы плазмотронов при температуре 293,15 К и нормальном атмосферном давлении (101,325 кПа).

Массовый расход рабочего газа при этом в двухканальном плазмотроне отличался от массового расхода в трёхканальном плазмотроне, т. е. в соответствии с принятыми условиями он был меньше. На стенках плазмотронов и на поверхностях электродных модулей задавались условия прилипания при той же температуре, причем для элементов конструкции исследуемых плазмотронов (электродных узлов и корпусов) были выбраны соответствующие материалы, а именно, пластик, медь и сталь. На поверхностях дуг, горящих в каналах, в сужающемся сопле и в смесительной камере исследуемых плазмотронов и снаружи (в окружающей среде), т. е. там, где встречаются электрические дуги и они замыкаются на одну дугу, задавалась скорость в направлении оси соответствующей области плазмотронов, в которой находится участок дуг. Эта скорость была равна среднемассовому модулю скорости течения холодного плазмообразующего газа [9]. Также задавались (обязательно) поверхностная и (необязательно) объёмная плотности теплового потока, т. е. отношения тепловой мощности дуги, соответ-

венно, к её площади поверхности и к её объёму (далее в тексте и на рисунках — о.п.т.п.). Кроме того, на поверхностях окружающей среды, которая учитывалась внешней сеткой программы GAMBIT, были заданы возвратные течения при тех же условиях.

Таким образом, было промоделировано течение воздуха с учётом его нагрева от дугового столба в областях тангенциальной подачи, в цилиндрическом канале, в сужающемся сопле двухканального и в смесительной камере трёхканального исследуемых плазмотронов и за их пределами. Были построены поля скоростей: модуля скорости, а также тангенциальной, радиальной и осевой составляющих скорости; поля температуры рабочего газа в различных сечениях по продольной координате; рассчитаны среднемассовые значения этих величин и построены их зависимости от продольной координаты, т. е. профили среднемассовых скоростей и профили температуры рабочего газа (рис. 2, рис. 3).

Полученные результаты продемонстрировали, что заметное уменьшение среднемассового модуля скорости течения рабочего газа наблюдается в каналах исследуемых плазмотронов по мере приближения к выходу и снаружи по мере удаления от сужающегося сопла и смесительной камеры исследуемых плазмотронов (см. рис. 2). При моделировании выяснилось, что тангенциальная составляющая среднемассовой скорости рабочего газа перестаёт вносить наибольший вклад в модуль среднемассовой скорости рабочего газа в сечении канала исследуемых плазмотронов возле наконечника электродов, а далее наибольший вклад в модуль среднемассовой скорости рабочего газа вносит его осевая составляющая, т. е. так же, как и в случае с холодным продувом [9]. При этом среднемассовая тангенциальная скорость газа не равна нулю, благодаря чему электрическая дуга не контактирует со стенками каналов, с сужающимся соплом и смесительной камерой исследуемых плазмотронов, что защищает их от разрушения.

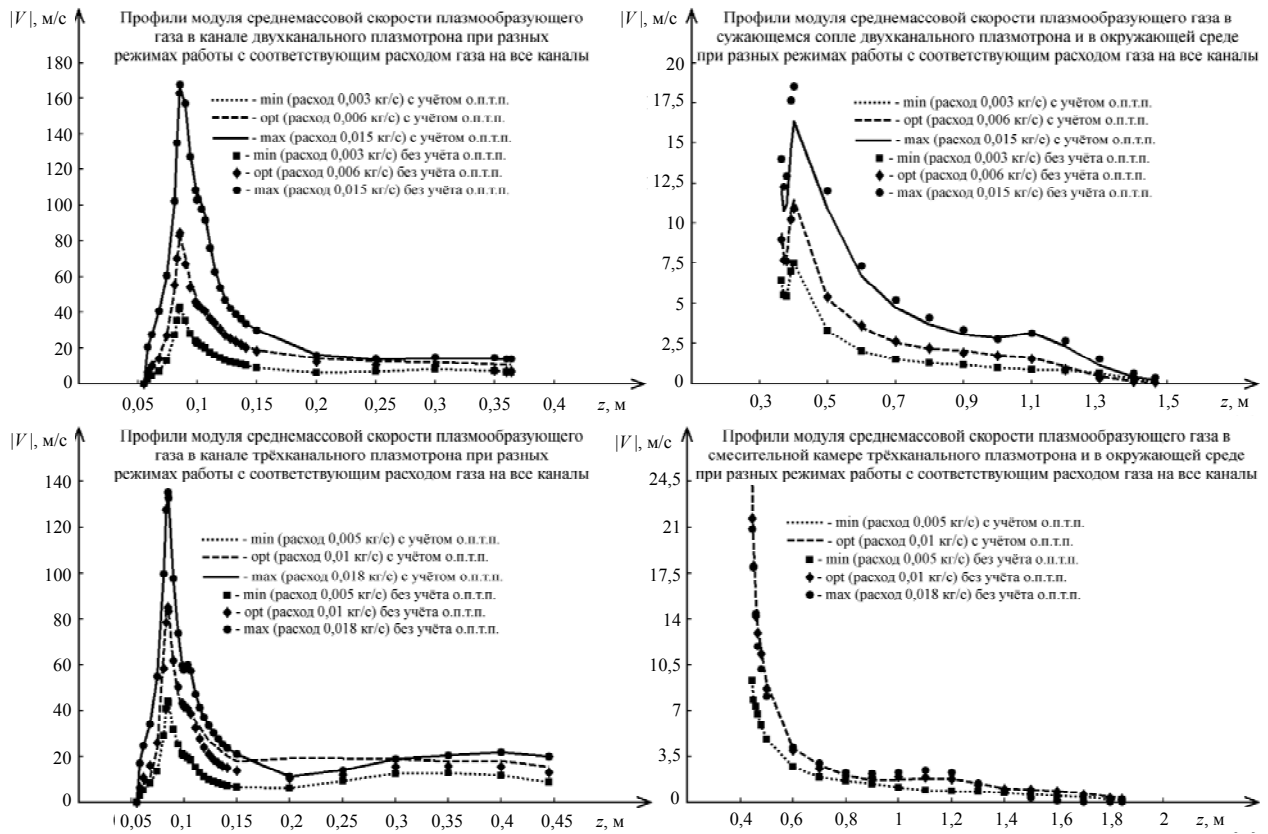


Рис. 2. Профили модуля среднемассовой скорости рабочего газа в плазматронах при разных режимах работы

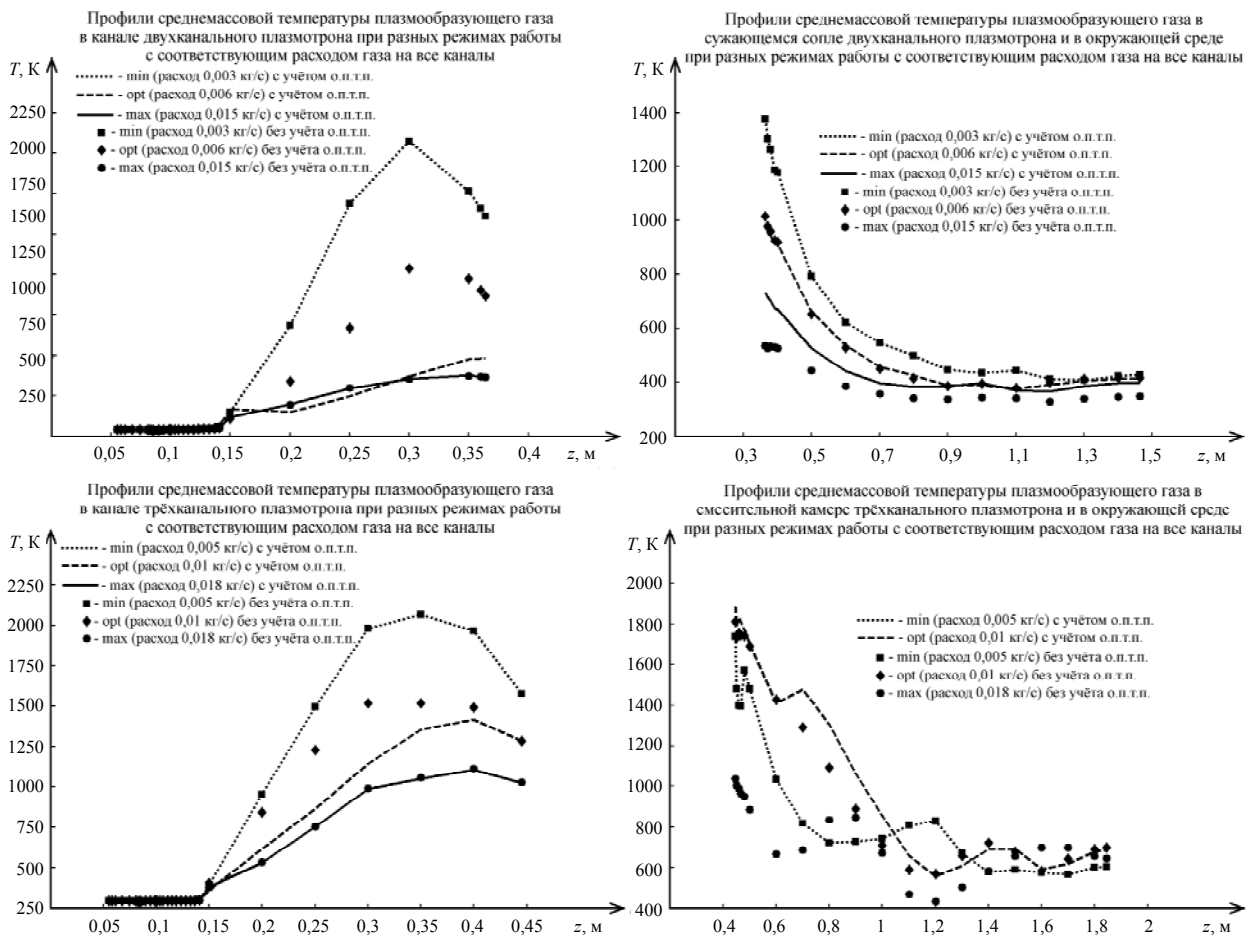


Рис. 3. Профили среднемассовой температуры рабочего газа в плазматронах при разных режимах работы

Температура рабочего газа внутри канала в области его тангенциальной подачи и по всей длине электрода соизмерима с температурой окружающей среды. На участке от наконечника электрода до сечения, отстающего от выхода из канала на 1/3 длины канала, наблюдается резкое повышение температуры рабочего газа, а с приближением к выходу из канала — её понижение. Далее рабочий газ резко охлаждается при движении в сужающемся сопле и в смесительной камере исследуемых плазмотронов и продолжает остывать с выходом в окружающую среду (см. рис. 3). Значения модуля скорости рабочего газа на выходе из сужающегося сопла и смесительной камеры исследуемых плазмотронов, полученные с учётом нагрева от столба электрической дуги, в 2—6 раз превышают значения модуля рабочего газа, которые были получены ранее при детальном исследовании холодного продува [9].

Основные результаты работы можно также суммарно представить в виде таблицы.

Заключение

В работе были рассчитаны поля газодинамических параметров течения плазмообразующего газа: поля модуля и всех составляющих скорости рабочего газа и поля его температуры с учётом нагрева газа от дугового столба в каналах и за срезом сопла и смесительной камеры исследуемых плазмотронов переменного тока; построены профили среднемассовых скоростей и температуры рабочей газовой струи. Впервые было выполнено 3D-моделирование течения газа с учётом его нагрева от столба электрической дуги, движущейся со скоростью холодного газа [9]. Оказалось, что скорость газа, нагретого от электродугового столба, на выходе из сопла и смесительной камеры исследуемых плазмотронов в 2—6 раз превышает скорость газа при холодном продуве [9].

Итоги исследования, таким образом, позволяют планировать дальнейшее использование разработанной модели, учитывающей горение электрической дуги, движущейся со скоростью

Таблица

Параметры плазмообразующего газа	Однофазный двухканальный плазмотрон			Трёхфазный трёхканальный плазмотрон		
	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
Q_m — массовый расход газа, кг/с	0,003—0,015			0,005—0,018		
Условия течения газа						
V_{max} — 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

течения уже нагретого газа, тем более, что расчеты в представленной работе подтверждены также экспериментально при многократных испытаниях действующих образцов исследуемых плазматронов. Предполагается провести также расчёт параметров исследуемых плазматронов и согласование результатов расчётных и экспериментальных данных, полученных при испытании действующих образцов исследуемых плазматронов, с варьированием массового расхода рабочего газа и мощности плазматронов.

Литература

1. Рутберг Ф. Г., Павлов А. В., Попов С. Д. и др. // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47. № 2. С. 193.

2. Попов С. Д., Серба Е. О., Суров А. В. и др. // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2012. № 5. С. 50.

3. Степанов Е. Ю., Долиновская Р. В., Шабалин С. А. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия: Наука и образование. 2012. № 3. Часть 2. С. 110.

4. Жуков М. Ф., Аньшаков А. С., Лукашов В. П. и др. В сборнике «Высокотемпературные течения и теплообмен». Новосибирск. 1990. С. 3.

5. Жуков М. Ф., Засыпкин И. М., Тимошевский А. Н. и др. // Низкотемпературная плазма. Труды Института теплофизики СО РАН. 1999. Т. 17. С. 712.

6. Жуков М. Ф. // Низкотемпературная плазма. Труды Института теплофизики СО РАН. 2004. Т. 20. С. 15.

7. Жовтянский В. А. // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2009. № 4. С. 97.

8. Аньшаков А. С., Урбах Э. К., Чередниченко В. С. и др. // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2012. № 5. С. 4.

9. Боровской А. М. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 4. С. 450.

Simulation of gas flow in the cylindrical channels of high-voltage AC plasma torches subject to heating

A. M. Borovskoi

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

Received September 2, 2014

The characteristics of plasma torches (PT) depend on arrangement of plasma gas supply and on the interaction nature of the gas flow with electric arcs; therefore 3D-modelling of the air flow was performed in the tangential feed's areas, in the cylindrical channel, in the tapering nozzle chamber and in the mixing chamber of investigated PT and outside (in the environment), taking into account the heating by electric arc. The velocity of the gas, heated by the electric arc, in the output of tapering nozzle and of mixing chamber of PT is 2—6 times higher, than the velocity of cold gas.

PACS: 47.55.Ca

Keywords: plasma torch, plasma gas flow, heating by electric arc, 3D-modelling.

References

1. F. G. Rutberg, A. V. Pavlov, S. D. Popov, et al., High Temp. **47**, 193 (2009).
2. S. D. Popov, E. O. Serba, A. V. Surov, et al., Energotekhnologii i Resursosberezhenie, No. 5, 50 (2012).
3. E. Yu. Stepanov, R. V. Dolinovskaya, and S. A. Shabalin, Nauchno-Tekhnicheskie Vedomosti SPbGPU, Nauka i Obrazovanie, No. 3, Part 2, 110 (2012).
4. M. F. Zhukov, A. S. An'shakov, V. P. Lukashov, et al., in *High-Temperature Flows and Heat Exchange*. Coll. Articl. (Novosibirsk, 1990), p. 3 [in Russian].
5. M. F. Zhukov, I. M. Zasyupkin, A. N. Timoshevsky, et al., in Proc. of Institute for Thermal Physics on the Low-Temperature Plasma. **17**, 712 (1999).
6. M. F. Zhukov, in Proc. of Institute for Thermal Physics on the Low-Temperature Plasma. **20**, 97 (2004).
7. V. A. Zhovtyansky, Energotekhnologii i Resursosberezhenie, No. 4, 97 (2009).
8. A. S. An'shakov, E. K. Urbakh, V. S. Cherednichenko, et al., Energotekhnologii i Resursosberezhenie, No. 5, 4 (2012).
9. A. M. Borovskoi, Uspekhi Prikladnoi Fiziki **1**, 450 (2013).