

# Физика плазмы и плазменные методы

УДК 533.17

## Моделирование течения плазмообразующего газа с учётом его взаимодействия с электрической дугой в каналах высоковольтных плазмотронов переменного тока

А.М. Боровской

*Характеристики плазмотронов (П) 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 П и за их пределами (в окружающей среде); причём скорость газа, нагретого от дугового столба, на выходе из сужающегося сопла и из смесительной камеры П в 2–6 раз больше скорости холодного газа.*

Рас: 47.55.Са

*Ключевые слова:* плазмотрон, течение, плазмообразующий газ, нагрев газа, электродуговой столб, 3D-моделирование.

### Введение

Физические характеристики генераторов низкотемпературной плазмы (плазмотронов), зависят от взаимодействий плазмообразующих рабочих газовых струй с электрическими дугами и от организации подач плазмообразующих рабочих газов. Высоковольтные плазмотроны переменного тока мощностью до 50 кВт со стержневыми электродами, установленными в цилиндрических каналах плазмотронов, были разработаны и испытаны в Институте электрофизики и электроэнергетики РАН (ИЭЭ РАН) [1–6]. При этом в последние десятилетия проводился ряд расчётно-теоретических [5] и экспериментальных исследований [6] не только в ИЭЭ РАН, но и в других научно-исследовательских учреждениях [7–11], в результате которых были определены внешние характеристики плазмотронов и физические параметры в их факелах [4]. Однако свойства электрических дуг, горящих в цилиндрических каналах плазмотронов, пока полностью ещё не изучены, хотя к настоящему времени выполнен большой объём научно-исследовательской работы.

В этой связи тщательное изучение и физических процессов, и физических параметров, характеризующих эти сложные процессы, для

дальнейшего эффективного усовершенствования и практического применения исследуемых плазмотронов является актуальным и своевременным; так как эффективность высоковольтных плазмотронов переменного тока, их надёжность, устойчивость, обеспечение длительного срока непрерывной работы и, особенно, управление этими процессами [11] являются важными инженерными и практическими задачами, связанными как раз с процессами течения холодных и разогретых в результате взаимодействия с электрической дугой плазмообразующих газов, двигающихся в каналах исследуемых плазмотронов с дозвуковой скоростью. Решение всех этих проблем невозможно без постановки экспериментальных исследований, направленных на детальное изучение физико-химических процессов и выявление роли газодинамических и кинетических аспектов с целью построения физико-математических моделей, адекватно описывающих наблюдаемые и исследуемые явления. При этом необходимо убедительное обоснование и разумное применение экспериментальных методов изучения тонкой структуры реагирующих течений, обеспечивающих получение достоверной информации о развитии процесса протекания газового потока в цилиндрических каналах исследуемых плазмотронов с газовыхревой стабилизацией электрической дуги.

Целью данной работы являлось моделирование течений плазмообразующего рабочего газа (воздуха), подаваемого в плазмотрон тангенциально, с учётом его нагрева от столба электрической дуги.

**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 10 марта 2014 г.

© Боровской А.М., 2014

### Постановка задачи.

Объектами исследования в данной работе являлись высоковольтные плазмотроны переменного тока с газовихревой стабилизацией дуги, а именно, однофазный двухканальный и трёхфазный трёхканальный плазмотроны, которые похожи конструктивно, так как имеют одинаковые электродные узлы. Однако их конструкции различаются 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). Высоковольтные плазмотроны переменного тока, разработанные в ИЭЭ РАН, конструктивно отличаются от аналогичных плазмотронов, разработанных другими научно-исследовательскими учреждениями, так как их внешний диаметр равен диаметру канала и стенка канала не является рабочей поверхностью электрода.

### Моделирование течения плазмообразующего газа

Для построения сетки расчётной области и моделирования течения плазмообразующего рабочего газа использовались, соответственно, программные продукты GAMBIT и FLUENT с применением модели турбулентности Spalart-Allmaras. В этих расчётах плотность плазмообразующего рабочего газа, т.е. воздуха, была определена по формуле идеального газа. Соответственно, вязкость, удельная теплоёмкость и коэффициент теплопроводности определялись с учётом кинетической теории. Молярная масса была принята постоянной, а число степеней свободы — равным 5, т.к. основным компонентом воздушной газовой

смеси является двухатомный газ азот. В качестве граничных условий 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, т.е. при 101325 Па. Массовый расход рабочего плазмообразующего газа при этом в двухканальном плазмотроне из-за конструктивных особенностей отличался от массового расхода в исследуемом трёхканальном плазмотроне, а именно, в соответствии с принятыми условиями он был меньше. На стенках исследуемых плазмотронов и на поверхностях электродных модулей задавались условия прилипания при температуре 293,15 К. При этом для элементов конструкции исследуемых плазмотронов, например, электродных узлов и корпусов плазмотронов, были выбраны соответствующие материалы: пластик, медь и сталь. На поверхностях дуг, горящих в каналах, в сужающемся сопле двухканального и в смесительной камере трёхканального исследуемых плазмотронов и снаружи (в окружающей среде), т.е. там, где встречаются электрические дуги и замыкаются на одну дугу, задавалась скорость в направлении оси соответствующей области плазмотронов, в которой находится участок электрической дуги. При этом скорость была равна среднемассовому модулю скорости течения холодного плазмообразующего газа [12]. Также обязательно задавалась поверхностная плотность теплового потока, т.е. отношение тепловой мощности дуги к её площади поверхности, и необязательно задавалась объёмная плотность теплового потока, т.е. отношение тепловой мощности дуги к её объёму (далее в тексте и на рисунках — о.п.т.п.). На поверхностях окружающей среды, которая учитывалась внешней сеткой программы GAMBIT, были заданы возвратные течения при температуре 293,15 К и нормальном атмосферном давлении.

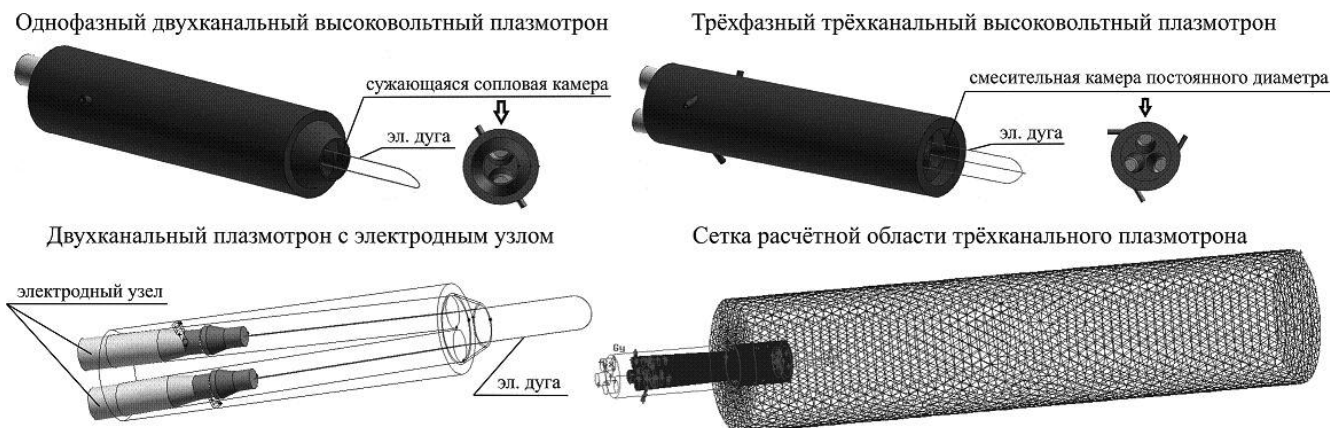


Рис. 1. Высоковольтные плазмотроны переменного тока с горящими электрическими дугами, с электродными узлами и с сеткой расчётной области

Таким образом, было промоделировано течение воздуха с учётом его нагрева от столба электрической дуги в областях тангенциальной подачи, в цилиндрическом канале, в сужающемся сопле двухканального и в смесительной камере трёхканального исследуемых плазмотронов и за их пределами, т.е. в окружающей среде. Были построены поля скоростей, соответственно, модуля скорости, а также тангенциальной, радиальной и осевой составляющих скорости. Были определены поля температуры плазмообразующего рабочего газа в различных сечениях по продольной координате, а также рассчитаны среднемассовые значения этих величин и построены их зависимости от продольной координаты, т.е. профили среднемассовых скоростей и профили температуры плазмообразующего рабочего газа. Результаты расчетов представлены на рис. 2–5.

В результате этого исследования было выявлено, что модуль среднемассовой скорости плазмообразующего рабочего газа принимает максимальное значение в сечении канала, близком к тангенциальному вдуву, и меняется в достаточно широком диапазоне, а именно, от десятков до сотен м/с (рис. 2, рис. 3), т.е. так же, как и в случае холодного продува [12]. Наибольший вклад в этих условиях вносит среднемассовая тангенциальная составляющая скорости плазмообразующего рабочего газа, равная нескольким десяткам м/с (так же, как и при холодном продуве [12]). При

этом стало очевидным, что минимальные значения среднемассового модуля скорости течения плазмообразующего рабочего газа наблюдаются в выходном сечении канала и варьируются в диапазоне от единиц до десятков м/с. Этот разброс от 1,5 до 5,5 раз больше, чем при холодном продуве, когда наблюдались изменения скорости только в пределах нескольких единиц. Наибольший вклад в этих условиях вносит среднемассовая осевая составляющая скорости плазмообразующего рабочего газа, которая меняется в таких условиях от единиц до десятков м/с, т.е. в 2–6,5 раз выше, чем в случае холодного продува, когда наблюдались изменения скорости только в пределах нескольких единиц.

Результаты этого исследования также продемонстрировали, что заметное уменьшение среднемассового модуля скорости течения плазмообразующего рабочего газа наблюдается в каналах исследуемых плазмотронов по мере его приближения к выходу и снаружи, а именно, в окружающей среде по мере удаления от сужающегося сопла двухканального и от смесительной камеры трёхканального исследуемых плазмотронов. Было также выявлено, что максимальное значение принимает модуль среднемассовой скорости плазмообразующего рабочего газа при исследовании двухканального плазмотрона в этой ситуации в окружающей среде рядом с выходным сечением сужающегося сопла исследуемого плазмотрона

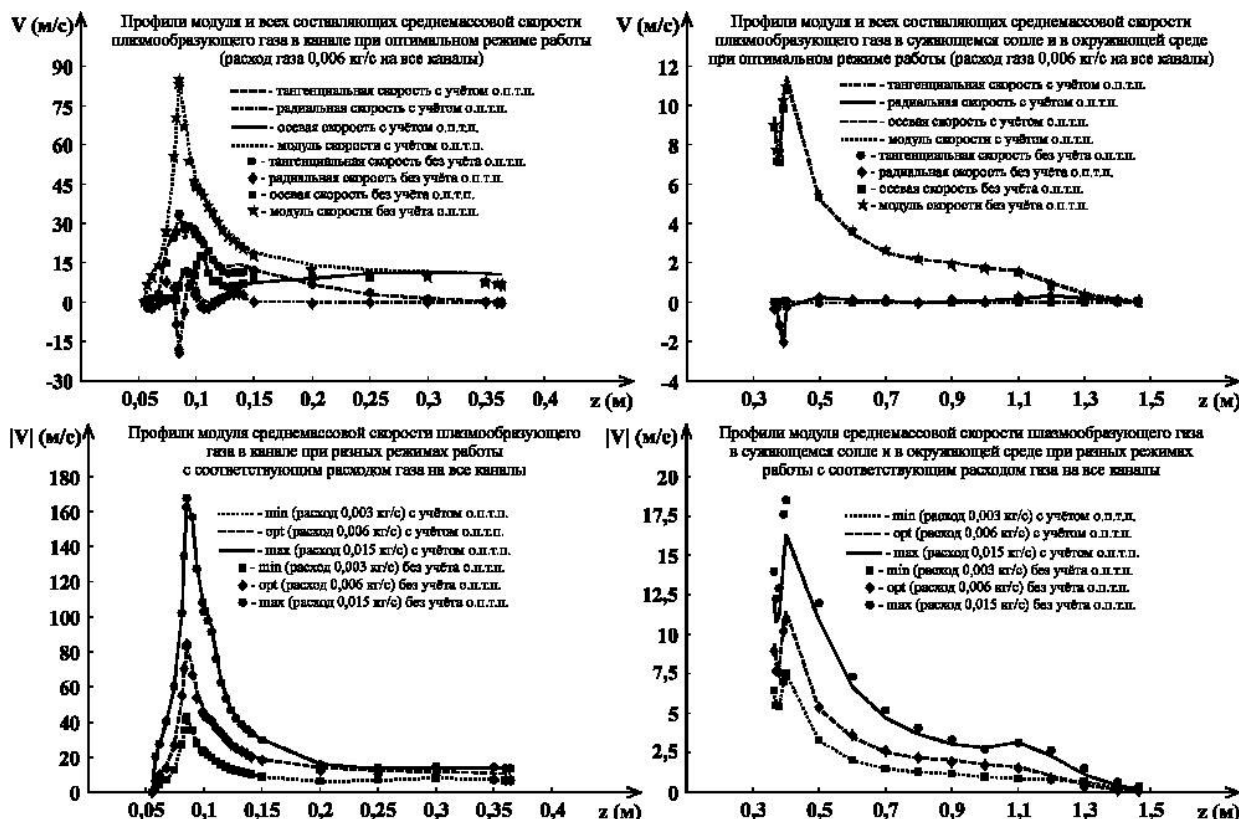


Рис. 2. Профили среднемассовых скоростей рабочего газа в канале, в сужающемся сопле двухканального плазмотрона и в окружающей среде

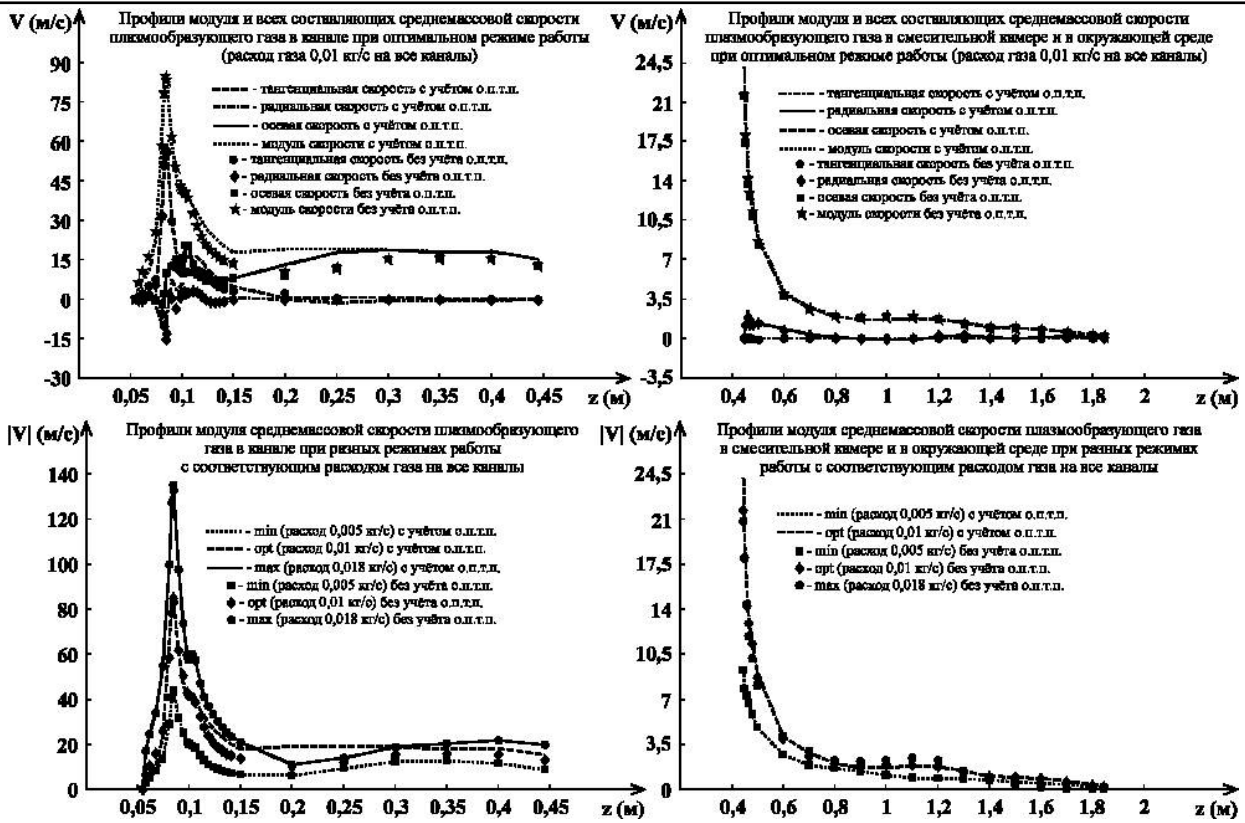


Рис. 3. Профили среднemasовых скоростей рабочего газа в канале, в смесительной камере трёхканального плазматрона и в окружающей среде

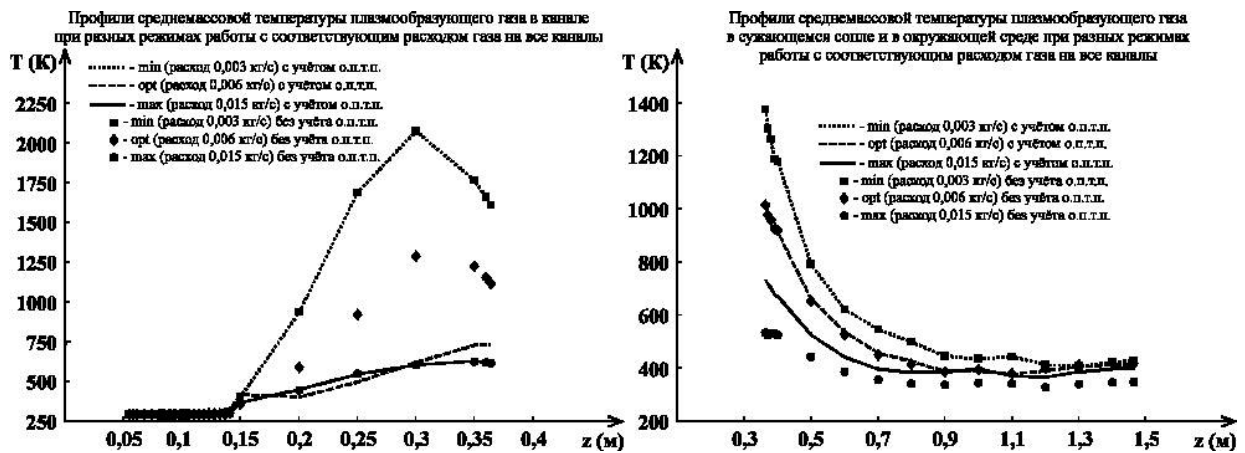


Рис. 4. Профили среднemasовой температуры рабочего газа в канале, в сужающемся сопле двухканального плазматрона и в окружающей среде при разных режимах работы

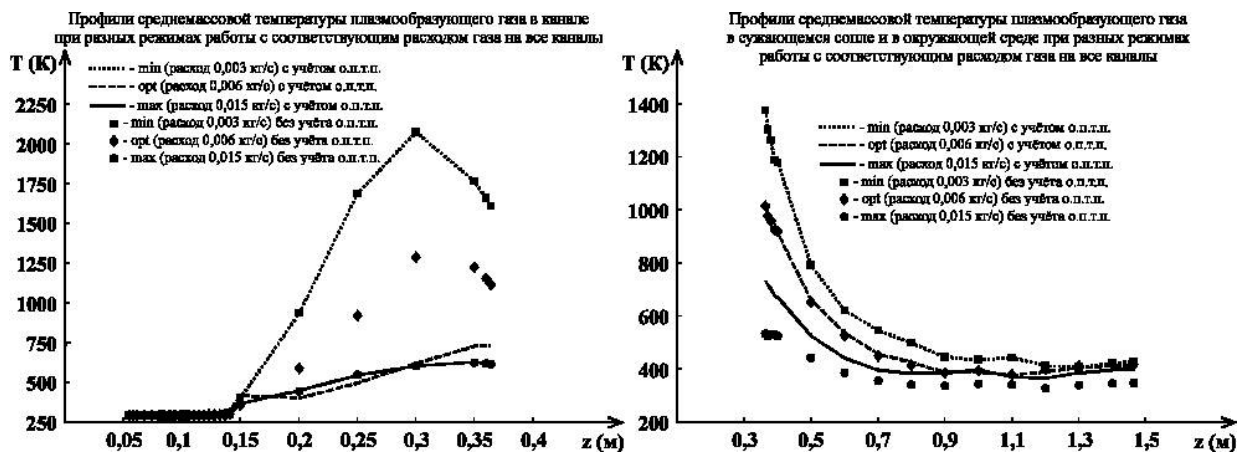


Рис. 5. Профили среднemasовой температуры рабочего газа в канале, в смесительной камере трёхканального плазматрона и в окружающей среде при разных режимах работы

(рис. 2), а в случае холодного продува максимальное значение модуля среднемассовой скорости плазмообразующего рабочего газа наблюдалось в начальном сечении сужающегося сопла этого плазмотрона [12].

При аналогичном исследовании трёхканального плазмотрона стало очевидным, что максимальное значение модуля среднемассовой скорости плазмообразующего рабочего газа в этой же ситуации наблюдается в начальном сечении смесительной камеры исследуемого плазмотрона при любых обстоятельствах, т.е. и при холодном, и при горячем продувах, когда модуль среднемассовой скорости плазмообразующего рабочего газа меняется от единиц до десятков м/с (рис. 3). Эта скорость при горячем продуве от 2 до 6 раз больше, чем в случае холодного продува, когда наблюдалось изменение модуля среднемассовой скорости плазмообразующего рабочего газа только в пределах нескольких единиц [12]. Наибольший вклад в этих условиях вносит среднемассовая осевая составляющая скорости плазмообразующего рабочего газа (рис. 2, рис. 3), которая меняется в диапазоне от единиц до десятков м/с. Другими словами, при горячем продуве она в 2–7 раз выше, чем в случае холодного продува, когда наблюдалось изменение среднемассовой осевой составляющей скорости плазмообразующего рабочего газа только в пределах нескольких единиц.

В процессе моделирования выяснилось, что тангенциальная составляющая среднемассовой скорости плазмообразующего рабочего газа перестаёт вносить наибольший вклад в модуль среднемассовой скорости плазмообразующего рабочего газа в сечении канала исследуемых плазмотронов возле наконечника электродов, а далее наибольший вклад в модуль среднемассовой скорости плазмообразующего рабочего газа вносит его осевая составляющая (рис. 2, рис. 3), т.е. так же, как

и в случае с холодным продувом [12]. При этом среднемассовая тангенциальная скорость плазмообразующего рабочего газа не равна нулю, благодаря чему электрическая дуга не контактирует со стенками каналов исследуемых высоковольтных плазмотронов переменного тока с газовой стабилизацией электрической дуги, а также не контактирует с сужающимся соплом двухканального и со смесительной камерой трёхканального исследуемых плазмотронов, что защищает их сужающиеся сопла, смесительные камеры и корпуса от возможного разрушения в процессе взаимодействия рабочего газа с электрической дугой.

Температура рабочего газа внутри канала в области его тангенциальной подачи и по всей длине электрода соизмерима с температурой окружающей среды, а на участке от наконечника электрода до сечения, отстающего от выхода из канала на 1/3 длины канала, наблюдается резкое повышение температуры, причём с приближением к выходу наблюдается понижение температуры. Далее рабочий газ резко охлаждается при движении в сужающемся сопле двухканального и в смесительной камере трёхканального исследуемых высоковольтных плазмотронов переменного тока. Ещё более резко остывает рабочая газовая струя с выходом в окружающую среду (см. рис. 4 и рис. 5). Значения модуля скорости плазмообразующего рабочего газа на выходе из сужающегося сопла двухканального и из смесительной камеры трёхканального исследуемых плазмотронов, полученные с учётом нагрева от столба электрической дуги, в 2–6 раз превышают значения модуля скорости плазмообразующего рабочего газа, которые были получены ранее при детальном исследовании холодного продува [12].

Итоговые результаты этих исследований представлены в таблице.

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
$V_{max}$ — 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

Параметры плазмообразующего газа	Однофазный двухканальный плазмотрон			Трёхфазный трёхканальный плазмотрон		
$V_{\min \text{ вых}}$ — 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
$V_{z \text{ вых}}$ — 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
$V_{\max \text{ сопл., см.к.}}$ — 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
$V_{z \text{ сопл., см.к.}}$ — 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

### Заключение

В итоге моделирования были рассчитаны поля газодинамических параметров течения плазмообразующего рабочего газа (воздуха), а именно, поля модуля и всех составляющих скорости плазмообразующего рабочего газа и поля его температуры с учётом нагрева плазмообразующего рабочего газа от столба электрической дуги в каналах и за срезом сужающегося сопла двухканального и смесительной камеры трёхканального исследуемых высоковольтных плазмотронов переменного тока. Одновременно были построены профили среднемассовых скоростей и температуры плазмообразующей рабочей газовой струи.

Отметим, что впервые было выполнено 3D-моделирование течения плазмообразующего газа с учётом его нагрева от столба электрической дуги, движущейся со скоростью холодного газа [12], для исследуемых высоковольтных плазмотронов переменного тока с газовихревой стабилизацией электрической дуги и со стержневыми электродами. Выявлено, что скорость газа, нагретого от электродугового столба, на выходе из сужающегося сопла двухканального и из смесительной камеры трёхканального исследуемых

плазмотронов в 2–6 раз превышает скорость газа при холодном продуве.

Полученные результаты выполненного этапа этих исследований позволяют планировать дальнейшее использование разработанной модели, учитывающей горение электрической дуги в различных областях исследуемых высоковольтных плазмотронов переменного тока, которая движется внутри каналов исследуемых плазмотронов со скоростью течения уже нагретого газа. Данная скорость была рассчитана в представленной работе и была подтверждена в многократных проведённых экспериментальных испытаниях с действующими образцами исследуемых высоковольтных плазмотронов переменного тока.

В дальнейшем также планируется выполнение более сложных численных расчётов параметров работающих высоковольтных исследуемых плазмотронов переменного тока, когда для согласования расчётных моделей будут также использоваться полученные экспериментальные данные при испытании действующих образцов исследуемых плазмотронов с варьированием массового 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., Сузов А.В., Сузов 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. Жовтянский В.А. // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2009. № 4. С. 97
11. Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Чередниченко В.С. и др. // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2012. № 5. С. 4
12. Боровской А.М. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 4. С. 450

## Modeling of plasma-forming gas flow in the channels of high-voltage AC plasma torches, taking into account the interaction with electric arc

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 10, 2014*

*The characteristics of plasma torches (PT) depends 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. 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. Nikonjv, 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. Zasyppkin, A. N. Timoshevskii, et al., Nizkotemperaturnaya Plazma **17**, 712 (1999).
9. M. F. Zhulov, Nizkotemperaturnaya Plazma **20**, 15 (2004).
10. V. A. Zhovtyanskii, Energotekhnologii i Resursosberezhenie, No. 4, 97 (2009).
11. A. S. An'shakov, E. K. Urbakh, V. S. Cherednichenlo, et al., Energotekhnologii i Resursosberezhenie, No. 5, 4 (2012).
12. A. M. Borovskoy, Uspekhi Prikladnoi Fiziki **1**, 450 (213)