

## Холодный продув газа в конструкции трёхфазного плазмотрона с рельсовыми электродами

А. М. Боровской

*От организации подачи плазмообразующего газа и характера взаимодействия газового потока с электрическими дугами зависят характеристики плазмотронов (далее – П). При оптимальном режиме работы инжектора и разрядной камеры рельсового П на первом этапе исследования было выполнено 3D-моделирование газодинамического течения холодного рабочего газа в области тангенциальной подачи, в цилиндрическом канале, в сужающемся сопле инжектора (однофазного двухканального П переменного тока), в разрядной камере трёхфазного рельсового П, а также за его пределами (в окружающей среде). При этом было проведено ещё сравнение течения холодного плазмообразующего газа в инжекторе и в разрядной камере рельсового П при включенном тангенциальном контуре его разрядной камеры с газодинамическим течением холодного плазмообразующего газа в его инжекторе и в разрядной камере при отключенном тангенциальном контуре его разрядной камеры.*

*Ключевые слова:* газодинамическое течение холодного плазмообразующего газа, трёхфазный плазмотрон переменного тока, рельсовые электроды.

### Введение

От организации подачи плазмообразующих газов в генераторах низкотемпературной плазмы, то есть в плазмотронах (далее – П), и от взаимодействия плазмообразующей струи с электрическими дугами зависят физические характеристики П. Установка системы электродов для трёхфазных П переменного тока производится в общей дуговой камере [1–7]. Электроды таких П по конструкции бывают кольцевыми, тороидальными и стержневыми [7] из различных материалов [8–11]. Из-за простоты конструкции наиболее широкое применение получили однокамерные трёхфазные П со стержневыми электродами с достаточно высоким КПД 70–80 % за счёт оптимального соотношения поверхности их электродов и объёма разрядной камеры, но в процессе эксплуатации из-за износа изменяются условия горения дуг [7], что является недостатком этих П. Такие П широко применяются для утилизации отравляющих веществ и для получения впоследствии синтез-газа.

Во ВНИИэлектромаш были разработаны и исследованы однокамерные трёхфазные П серии

ППТ мощностью до  $1,4 \times 10^5$  Вт и серии ЭДП до  $8 \times 10^7$  Вт [12–17]. Далее в ИПЭФ РАН, а с 2005 г. – в ИЭЭ РАН создавали и совершенствовали аналогичные П серии ИПЭ мощностью до  $5 \times 10^5$  Вт с рельсовыми электродами [18–24]. Для нагрева инертных газов, азота и водорода в однокамерных трёхфазных П применялись стержневые вольфрамовые или вольфрамосодержащие электроды, а для нагрева окислительных сред (прежде всего воздуха) – медные электроды.

В основу работы рельсового П [18–24] положен принцип движения электрических дуг под действием газодинамических и электродинамических сил, то есть рельсотронный эффект, когда дуги движутся по электродам в поле собственного тока. Достоинствами П данного типа являются низкое напряжение питающей сети при промышленной частоте и применение воздуха, либо других газов-окислителей в качестве плазмообразующих. Для надёжного поджига электрических дуг в разрядной камере П в его межэлектродном промежутке при малом напряжении питания используется в качестве инжектора однофазный двухканальный высоковольтный П переменного тока со стержневыми электродами в цилиндрических каналах (рис. 1) мощностью до  $10^4$  Вт, с напряжением питания в  $6 \times 10^3$  В, с частотой сети 50–60 Гц и с расходом нейтрального или окислительного газа от  $10^{-3}$  до  $5 \times 10^{-3}$  кг/с. Этот инжектор модели ИПЭ-12во заметно отличается малыми геометрическими размерами от ранее исследуемого в рабо-

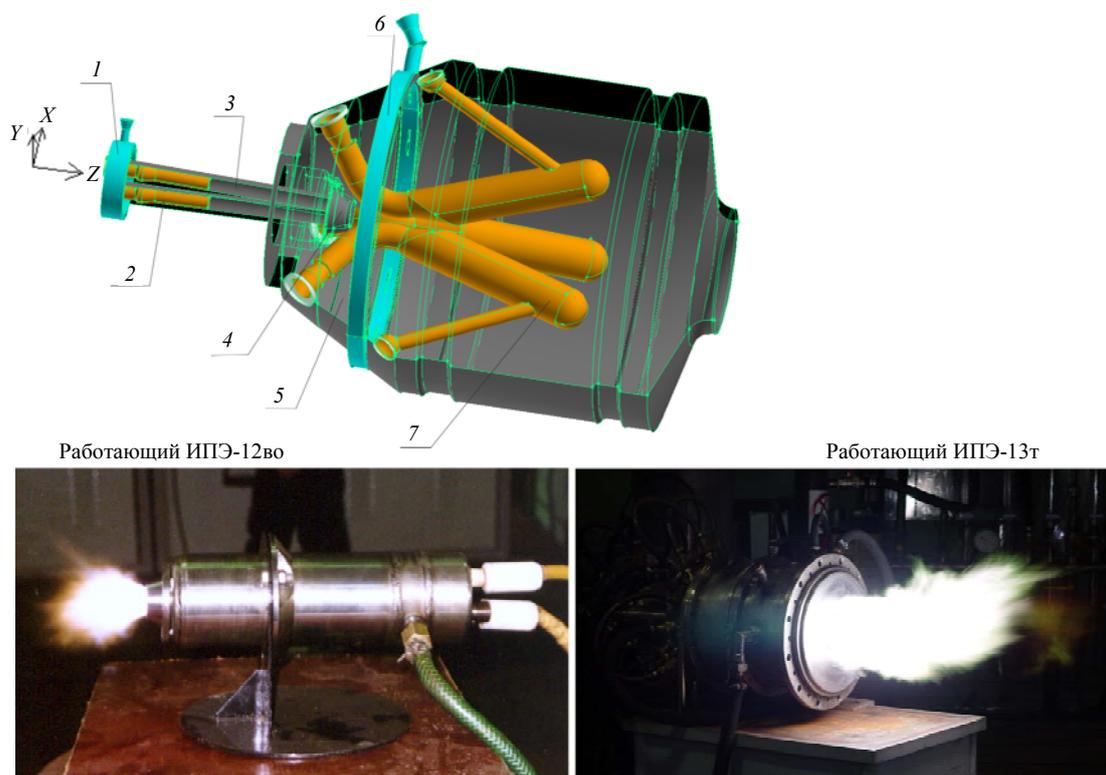
---

**Боровской Алексей Михайлович**, м.н.с.  
Институт Электрофизики и Электроэнергетики РАН.  
Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18.  
Тел. +7(911) 247-13-35.  
E-mail: borovskoi.alex@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 13 ноября 2017 г.*

тах [25–28] инжектора, а также меньшим расходом плазмообразующего газа. Инициированные дуги, перемещаясь по расходящимся электродам исследуемого рельсового П со скоростью 10–30 м/с, заполняют большой объём его разрядной камеры, двигаясь продольно и поперечно, что позволяет достичь высокий термический КПД – до 80 %. Холодный газ подаётся в пристеночную зону этого П, создавая изолирующий слой, поэтому в этой ука-

занной зоне резко падает концентрация заряженных частиц, и гаснет дуга. Плазменная струя со среднемассовой температурой от  $1,5 \times 10^3$  до  $6 \times 10^3$  К образуется из-за непрерывно повторяющегося уже описанного процесса на выходе из сопла исследуемого рельсового П. Для стабилизации процесса горения электрических дуг в разрядных камерах рельсовых П применяется обычно от 2 до 4 контуров тангенциальной подачи рабочего газа.



**Рис. 1.** Однокамерный П переменного тока с электродами рельсового типа модели ИПЭ-13т с инжектором модели ИПЭ-12во без корпуса: 1 – тангенциальный контур инжектора; 2 – стержневой электрод инжектора; 3 – цилиндрические каналы инжектора; 4 – сужающееся сопло инжектора; 5 – разрядная камера П; 6 – тангенциальный контур П; 7 – рельсовый электрод П.

Сейчас уже проведено множество экспериментальных и расчётно-теоретических исследований рельсовых П [18–24], но свойства электрических дуг, горящих в разрядных камерах таких П и их взаимодействия с газовыми потоками, ещё не до конца изучены. Поэтому по-прежнему актуальны вопросы эффективности, надёжности, устойчивости и длительного срока непрерывной работы рельсовых П. Вопросы взаимодействия газового потока с электрической дугой также необходимо решать в процессе исследования. Эти проблемы не решить без экспериментальных и теоретических исследований, направленных на тщательное изучение физико-химических явлений и выявление роли газодинамических и кинетических аспектов для построения физико-математических моделей, адекватно описывающих наблюдаемые физические процессы.

Целью данной работы является моделирование течения газа в контуре тангенциальной подачи, в цилиндрических каналах, в сужающемся сопле инжектора ИПЭ-12во, в разрядной камере ИПЭ-13т и за пределами его выходного сопла. Эти исследования рассматриваются как первый этап изучения свойств электрических дуг в разрядных камерах рельсовых плазмотронов.

### Холодный продув плазмотрона переменного тока с рельсовыми электродами

Чтобы построить сетку расчётной области и смоделировать течение холодного плазмообразующего газа в инжекторе ИПЭ-12во, в рельсовом ИПЭ-13т и в окружающей среде, использовались соответствующие программы GAMBIT и FLUENT

с применением модели турбулентности Spalart-Allmarès (полуэмпирической модели турбулентности с одним дифференциальным уравнением переноса для модифицированной турбулентной вязкости) из-за лучшей сходимости и устойчивости. Плотность рабочего газа – воздуха – в производимых расчётах определялась по формуле идеального газа; а вязкость, удельная теплоёмкость и коэффициент теплопроводности вычислялись с учётом кинетической теории; причём число степеней свободы было равно пяти, так как в составе воздуха в основном содержится двухатомный азот.

В сечениях входных отверстий в контуры тангенциальной подачи инжектора и разрядной камеры исследуемого рельсового П задавались массовые расходы газа для оптимального режима работы инжектора и разрядной камеры этого П, соответственно равные  $3 \times 10^{-3}$  кг/с и  $3 \times 10^{-2}$  кг/с, при температуре 293,15 К и атмосферном давлении 101 325 Па. Были заданы условия прилипания при температуре 293,15 К на стенках инжектора, разрядной камеры исследуемого рельсового П и на поверхностях всех электродов и изоляторов. Для

элементов конструкции всей установки в сборке были выбраны следующие материалы: пластик, медь и сталь. На поверхностях окружающей среды, учитываемой внешней сеткой программы GAMBIT, были заданы возвратные течения при температуре 293,15 К и атмосферном давлении 101 325 Па, так как газ – это сжимаемая среда.

Газовое течение моделировалось в контуре тангенциальной подачи, в цилиндрическом канале и в сужающемся сопле инжектора, а также в контуре тангенциальной подачи, в разрядной камере рельсового П и в окружающей среде. Были получены в итоге поля модуля скорости, а также тангенциальной, радиальной и осевой составляющих скорости плазмообразующего газа в центральном продольном сечении  $x = 0$  (см. рис. 2) и в различных сечениях по продольной координате, в частности, в сечении  $z = 0,5$  м (см. рис. 3), рассчитаны среднемассовые значения этих величин и построены их зависимости от продольной координаты, то есть профили среднемассовых скоростей (см. рис. 4); а результаты этих исследований представлены в таблице.

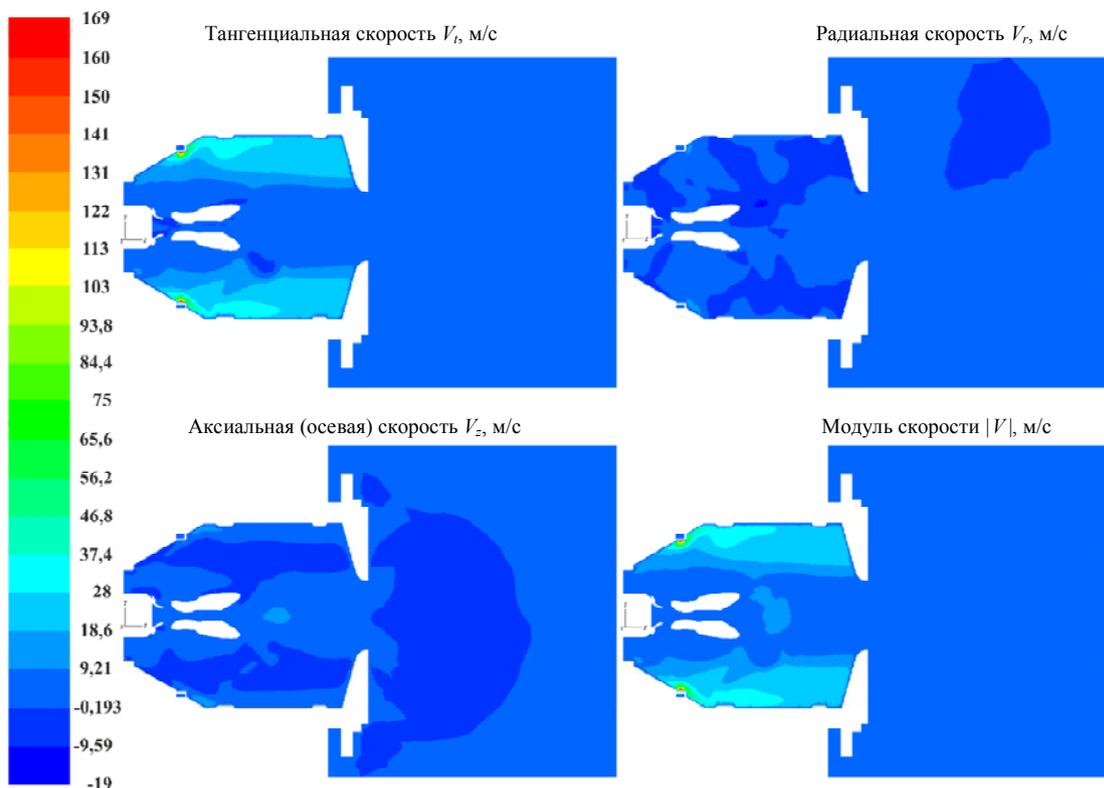


Рис. 2. Поля модуля и всех составляющих скорости рабочего газа в сужающемся сопле инжектора и в разрядной камере рельсового П в сечении  $x = 0$ .

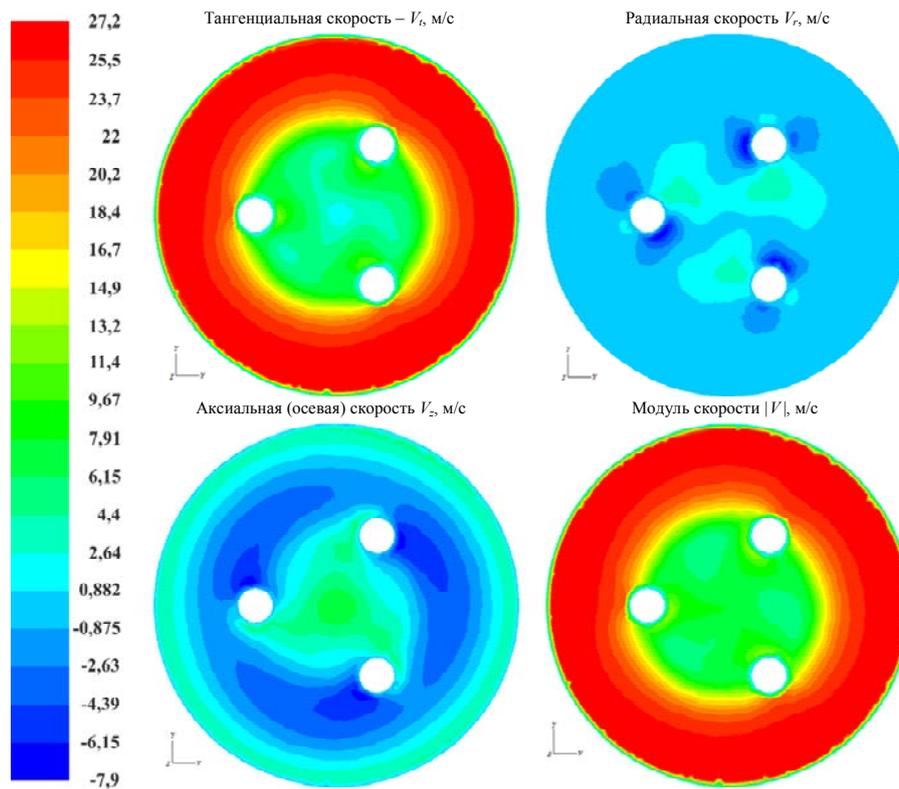


Рис. 3. Поля модуля и всех составляющих скорости рабочего газа в разрядной камере рельсового П в сечении  $z = 0,5$  м.

С учётом контура тангенциальной подачи в разрядной камере П с рельсовыми электродами

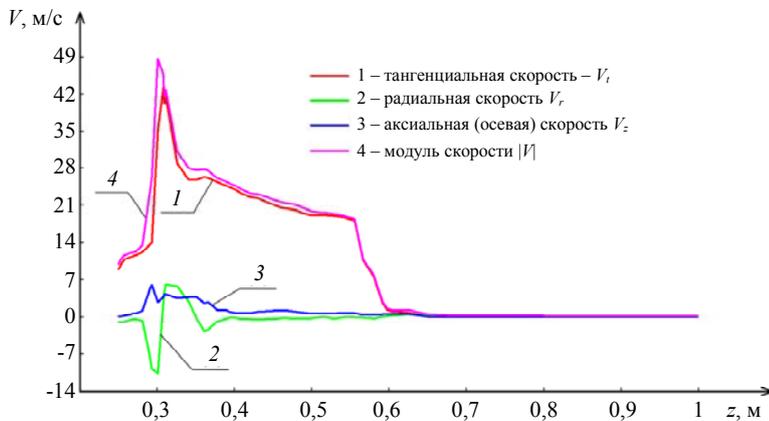
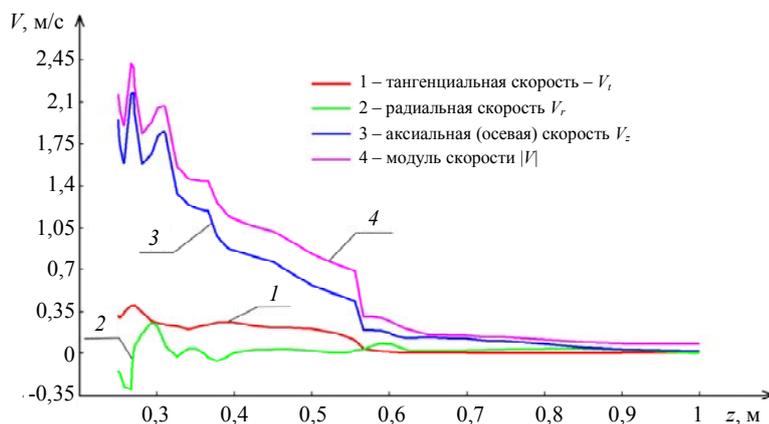


Рис. 4. Профили модуля и всех составляющих среднемассовой скорости рабочего газа в сужающемся сопле инжектора, в разрядной камере П и в окружающей среде: сверху – при оптимальном режиме работы инжектора (расход газа  $3 \times 10^{-3}$  кг/с) и рельсового П (расход газа  $3 \times 10^{-2}$  кг/с), снизу – при оптимальном режиме работы только инжектора (расход газа  $3 \times 10^{-3}$  кг/с).

Без учёта контура тангенциальной подачи в разрядной камере П с рельсовыми электродами



Таблица

## Результаты моделирования

Параметры плазмообразующего газа	Случай 1 – с подачей газа в тангенциальный контур разрядной камеры П с электродами рельсового типа	Случай 2 – без подачи газа в тангенциальный контур разрядной камеры П с электродами рельсового типа
$Q_{m1}$ – массовый расход газа в инжекторе, кг/с	0,003	0,003
$Q_{m2}$ – массовый расход газа в разрядной камере П с электродами рельсового типа, кг/с	0,03	0
<i>В сужающемся сопле инжектора ИПЭ-12во и в разрядной камере ИПЭ-13т</i>		
$ V_{\max \Pi} $ – max модуль скорости газа в сечении, близком к тангенциальному вдуву (в случае 1), в сечении сужающегося сопла инжектора рядом с выходом (в случае 2), и его среднемассовое значение, м/с	от 0 до 366,8886; 48,795616	от 0 до 5,858731; 2,4187188
$V_{t \Pi}$ – тангенциальная составляющая скорости газа в сечении, близком к тангенциальному вдуву (в случае 1), в сечении сужающегося сопла инжектора рядом с выходом (в случае 2), и её среднемассовое значение, м/с	от –356,7234 до 81,14181; –35,025986	от –0,3448434 до 1,650519; –0,39770359
$V_{r \Pi}$ – радиальная составляющая скорости газа в сечении, близком к тангенциальному вдуву (в случае 1), в сечении сужающегося сопла инжектора рядом с выходом (в случае 2), и её среднемассовое значение, м/с	от –229,5788 до 9,31319; –10,626491	от –1,050552 до 0,1059552; –0,30173048
$V_z \Pi$ – осевая (аксиальная) составляющая скорости газа в сечении, близком к тангенциальному вдуву (в случае 1), в сечении сужающегося сопла инжектора рядом с выходом (в случае 2), и её среднемассовое значение, м/с	от –32,70332 до 27,97028; 2,8505831	от –0,1918924 до 5,749821; 2,1658337
$ V_{\min \text{ вых}} $ – min модуль скорости газа в сечении, близком к выходу, и его среднемассовое значение, м/с	от 0 до 7,795778; 1,2959847	от 0 до 1,477012; 0,19992036
$V_{t \text{ вых}}$ – тангенциальная составляющая скорости газа в сечении, близком к выходу, и её среднемассовое значение, м/с	от –7,214216 до 0,01063089; –0,94133055	от –0,2762862 до 0,3245772; 0,0012464559
$V_{r \text{ вых}}$ – радиальная составляющая скорости газа в сечении, близком к выходу, и её среднемассовое значение, м/с	от –0,5032018 до 0,8972788; 0,28961101	от –0,2460485 до 0,3203169; 0,027184872
$V_z \text{ вых}$ – осевая (аксиальная) составляющая скорости газа в сечении, близком к выходу, и её среднемассовое значение, м/с	от –0,4150308 до 3,373498; 0,50528711	от –0,6049187 до 1,441785; 0,12654409
<i>В окружающей среде</i>		
$ V_{\max} $ – max модуль скорости газа в выходном сечении из П и его среднемассовое значение, м/с	от 0 до 7,796336; 1,3468692	от 0 до 1,460468; 0,2002202
$V_t$ – тангенциальная составляющая скорости газа в выходном сечении из П и её среднемассовое значение, м/с	от –5,833456 до 0,0608305; –0,83008826	от –0,2725272 до 0,3127299; 0,0013372645
$V_r$ – радиальная составляющая скорости газа в выходном сечении из П и её среднемассовое значение, м/с	от –0,07254668 до 1,650733; 0,53178918	от –0,3667281 до 0,3224206; 0,021325054
$V_z$ – осевая (аксиальная) составляющая скорости газа в выходном сечении из П и её среднемассовое значение, м/с	от –0,6271622 до 4,912898; 0,5642128	от –0,5871769 до 1,425983; 0,12450308

## Обсуждение результатов

Результаты исследования продемонстрировали, что в сужающемся сопле инжектора сначала происходит уменьшение среднемассового модуля скорости течения газа, далее наблюдается незначительное увеличение скорости по мере приближения к выходу из сопла этого инжектора только

при орт режиме его работы с расходом газа  $3 \times 10^{-3}$  кг/с. При оптимальном режиме совместной работы этого инжектора с таким же расходом и рельсового П с расходом газа, равным  $3 \times 10^{-2}$  кг/с, наблюдается увеличение среднемассового модуля скорости течения плазмообразующего газа. В разрядной камере исследуемого рельсового П при отключенном тангенциальном контуре наблюдает-

ся заметное уменьшение среднемассового модуля скорости течения газа по мере удаления от выходного сечения сопла его инжектора и приближения к выходу из разрядной камеры этого П. При включенном тангенциальном контуре в разрядной камере ИПЭ-13т происходит значительное увеличение среднемассового модуля скорости газа на всём её протяжении от инжектора до контура тангенциальной подачи. Далее наблюдается плавное уменьшение модуля скорости газа, а в зоне сужения разрядной камеры исследуемого рельсового П перед её выходом – его значительное уменьшение (рис. 4). В окружающей среде по мере удаления вылетающего газа из выходного сопла разрядной камеры этого П наблюдается уменьшение модуля скорости вылетающего газа при любых ситуациях: как при включенном тангенциальном контуре разрядной камеры исследуемого П, так и при выключенном.

Тангенциальная составляющая среднемассовой скорости плазмообразующего газа вносит наибольший вклад в модуль среднемассовой скорости в разрядной камере рельсового П и в окружающей среде за его пределами (рис. 2 и 4), что также было выяснено в процессе исследования. Если же отсутствует подача газа в тангенциальный контур разрядной камеры исследуемого рельсового П, то тангенциальная составляющая среднемассовой скорости газа перестаёт вносить существенный вклад в модуль среднемассовой скорости в канале его инжектора прямо перед областью минимального зазора между стенкой канала и поверхностью стержневого электрода, где первоначально зажигается электрическая дуга. Далее наибольший вклад в модуль среднемассовой скорости газа вносит его аксиальная (осевая) составляющая. В случае холодного продува инжектора, исследованного ранее [25, 26], тангенциальная скорость прекращала вносить наибольший вклад в модуль скорости в сечении цилиндрического канала возле наконечника его стержневого электрода. При этом среднемассовая тангенциальная скорость рабочего газа в соответствии с расчётными данными всегда не равна нулю, благодаря чему электрическая дуга не контактирует со стенками инжектора, с поверхностью его сужающегося сопла, а также со стенками разрядной камеры исследуемого рельсового П, защищая их от возможного разрушения в процессе взаимодействия газа с электрической дугой. Необходимость тангенциальной подачи плазмообразующего газа в разрядной камере рельсового П для организации эффективного взаимодействия газового потока с дугой и защиты корпуса этого П от разрушения была в очередной раз подтверждена в процессе этого исследования и моделирования.

## Заключение

В работе впервые было выполнено 3D-моделирование течения холодного воздуха в различных областях однокамерного трёхфазного рельсового плазмотрона модели ИПЭ-13т и проведено сравнение смоделированного газового течения с течением холодного плазмообразующего газа в его инжекторе модели ИПЭ-12во, в разрядной камере исследуемого рельсового П и в окружающей среде при отсутствии подачи рабочего газа в тангенциальные контуры разрядной камеры этого плазмотрона. Более подробный анализ полученных результатов данного исследования представлен в источнике [29]. В дальнейшем планируется использование разработанной модели в условиях горения дуги в электродуговой камере. При этом для согласования расчётных моделей будут также использоваться полученные экспериментальные данные при испытании рельсового П с учётом варьирования его мощности и массового расхода рабочего газа.

Были получены в ходе моделирования благодаря выполненным расчётам характеристики газового течения в области первоначального пробоа и возникновения электрической дуги, позволяющие оптимизировать конструкцию этого узла, в том числе и для возможного использования газовых смесей в качестве плазмообразующих. Полученные значения скорости газового потока в каналах инжектора [25–28] и данные ресурсных испытаний при этом позволяют оценить правильность принятых конструкторских решений и сделать вывод об эффективности газовихревой стабилизации процесса горения дуги в канале этого двухканального П со стержневыми электродами, то есть в инжекторе.

*Выражаю глубокую искреннюю благодарность своим коллегам из ИЭЭ РАН за эффективное сотрудничество и активное содействие при выполнении этой работы:*

1. Сафронову Алексею Анатольевичу, заведующему лабораторией плазмотронных систем (№ 0007), руководителю гранта РФФИ № 16-08-01073 А;

2. Кузнецову Владимиру Евгеньевичу, заведующему лабораторией перспективных конструкций плазмодинамических и электродных систем (№ 0014);

3. Сурову Александру Викторовичу, заведующему лабораторией плазмодинамических систем (№ 0008).

*Исследование выполнено по гранту РФФИ № 16-08-01073 А «Исследования параметров*

работы вспомогательного высоковольтного плазмотрона переменного тока с целью обеспечения условий инициирования мощной низковольтной дуги основного плазмотрона».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Geister D. E. Three-phase AC arc heater – contract no. AF 33(657)-8630, project no. 7065: Aerospace Research Laboratories Office of Aerospace Research United States Air Force Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1964. P. 1–139.
2. Bebbler H. Scaling-up of Plasma Processes // High Temp Chem Process. 1994. Vol. 3. P. 665.
3. Saevardsdottir G., Larsen H. L., Bakken J. A. Modelling of AC arcs in three-phase submerged arc furnaces / Proc. INFACON-8: The 8th International ferro-alloys congress (Beijing, 1998), pp. 317–322.
4. Rehmert C., Rohani V., Cauneau F., Fulcheri L. // Plasma Chem Plasma Process. 2013. Vol. 33. P. 491.
5. Rehmert C., Fabry F., Rohani V., Cauneau F., Fulcheri L. // Plasma Chem Plasma Process. 2014. Vol. 34. No. 4. P. 975.
6. Fulcheri L., Fabry F., Takali S., Rohani V. // Plasma Chem Plasma Process. 2015.
7. Глебов И. А., Рутберг Ф. Г. Мощные генераторы плазмы. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
8. Горячев В. Л., Ходаковский А. М. Тепловая модель эрозии электрода контрагированной дуги / Материалы конференции «Физика низкотемпературной плазмы (ФНТП-95)» (Петрозаводск. 1995). Т. 2. С. 186–188.
9. Виноградов С. Е., Рыбин В. В., Рутберг Ф. Г., Сафронов А. А., Шекалов В. И., Ширяев В. Н., Кузнецов В. Е. // Вопросы материаловедения. 2002. № 2. С. 52.
10. Rutberg Ph. G., Kumkova I. I., Kuznetsov V. E., Popov S. D., Rutberg A. Ph., Safronov A. A., Shiryaev V. N., Surov A. V. High-voltage Plasma Generators of Alternating Current With Rod Electrodes Stationary Operating On Oxidizing Media / Proc. PPS-2007: Pulsed Power and Plasma Science 2007, The 16th IEEE International Pulsed Power Conference and The 34th IEEE International Conference on Plasma Science (Albuquerque, NM, 2007), pp. 1556–1559.
11. Budin A. V., Pinchuk M. E., Kuznetsov V. E., Rutberg F. G. // Technical Physics Letters. 2014. Vol. 40. No. 12. P. 1061.
12. Рутберг Ф. Г. Трёхфазный плазмотрон: в кн. «Некоторые вопросы исследования газоразрядной плазмы и создания сильных магнитных полей» – Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1970. С. 8–19.
13. Киселёв А. А., Рутберг Ф. Г. Трёхфазная плазмотронная установка: в кн. «Генераторы плазменных струй и сильноточные дуги». – Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1973. С. 31–39.
14. Киселёв А. А., Рутберг Ф. Г. // Теплофизика высоких температур. 1974. Т. 12. № 4. С. 827.
15. Рутберг Ф. Г., Бородин В. С., Григорьев М. А., Киселёв А. А. // Теплофизика высоких температур. 1978. Т. 16. № 6. С. 1285.
16. Братцев А. Н., Григорьев М. А., Сафронов А. А., Федюкович В. Н., Ширяев В. Н. Комплексное исследование параметров электрического разряда в трёхфазном плазмотроне переменного тока: в сб. «Генераторы плазмы и системы электропитания». – Л.: ВНИИЭлектромаш, 1985. С. 24–32.
17. Сафронов А. А., Арабаджян Р. И., Григорьев М. А., Федюкович В. Н. Измерение мгновенной мощности трёхфазного плазмотрона: в сб. «Источники питания импульсного и кратковременного действия для физических установок». – Л.: ВНИИЭлектромаш, 1985. С. 48–57.
18. Арабаджян Р. И., Сафронов А. А., Ширяев В. Н. Конструкции плазмотронов на рельсотронном движении дуг: в сб. «Исследования мощных генераторов плазмы и систем их электропитания». – Л.: ВНИИЭлектромаш, 1989. С. 11–16.
19. Rutberg Ph. G., Safronov A. A. Power three-phase Plasma generators for Plasma chemistry and wastes destruction / Foroth European Conf. on Thermal Plasma Processes (Athens. 1996).
20. Рутберг Ф. Г., Сафронов А. А., Гончаренко Р. Б., Кузнецов В. Е. // Известия АН Энергетика. 1996. № 4. С. 114.
21. Rutberg Ph. G., Safronov A. A., Popov S. D., Surov A. V., Nakonechny Gh. V. // Plasma Physics and Controlled Fusion, Bristol. 2005. Vol. 47. P. 1681.
22. Рутберг Ф. Г., Сафронов А. А., Попов С. Д., Суров А. В., Наконечный Г. В. // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44. № 2. С. 205.
23. Попов С. Д., Рутберг А. Ф., Сафронов А. А. // Теплофизика высоких температур. 2007. Т. 45. № 1. С. 5.
24. Васильева О. Б., Кумкова И. И., Рутберг А. Ф., Сафронов А. А., Ширяев В. Н. // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51. № 1. С. 36.
25. Боровской А. М. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 4. С. 450.
26. Боровской А. М. // Прикладная физика. 2014. № 2. С. 21.
27. Боровской А. М. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 105.
28. Боровской А. М. // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 40.
29. Боровской А. М. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 1. С. 18.

PACS: 47.55.Ca

## Cold blowing of gas in the construction of a three-phase plasma torch with rail electrodes

A. M. Borovskoy

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

Received November 13, 2017

*The characteristics of plasma torches (PT) depend on arrangement of plasma-forming gas supply and on the interaction nature of the gas flow with electric arcs. 3D-modelling of cold air flow was per-*

**formed at the first research stage in the tangential feed, in the cylindrical channel, in the tapering nozzle chamber of injector (single-phase two-channel AC PT); in the discharge chamber of three-phase rail PT and outside (in the environment), when the injector and of the discharge chamber of three-phase PT with rail electrodes were working under optimum mode. The comparison of cold air flow in the injector and in the discharge chamber of rail PT at enabled discharge chamber's tangential feed and of cold air flow in the injector and in the discharge chamber of rail PT at disabled discharge chamber's tangential feed was made.**

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

## REFERENCES

1. D. E. Geister, *Three-phase AC arc heater* (Contract no. AF 33(657)-8630, project no. 7065: Aerospace Research Laboratories Office of Aerospace Research United States Air Force Wright-Patterson Air Force Base (Ohio, 1964). P. 1–139.
2. H. Bebbler, *High Temp Chem Process.* **3**, 665 (1994).
3. G. Saevarsdottir, H. L. Larsen, and J. A. Bakken, in *Proc. INFACON-8: The 8th International ferro-alloys congress* (Beijing, 1998), pp. 317–322.
4. C. Rehmet, V. Rohani, F. Cauneau, and L. Fulcheri, *Plasma Chem Plasma Process.* **33**, 491 (2013).
5. C. Rehmet, F. Fabry, V. Rohani, F. Cauneau, and L. Fulcheri, *Plasma Chem Plasma Process.* **34** (4), 975 (2014).
6. L. Fulcheri, F. Fabry, S. Takali, and V. Rohani, *Plasma Chem Plasma Process.* (2015).
7. I. A. Glebov and F. G. Rutberg, *Powerful plasma generators* (Energoatomizdat, Moscow, 1985) [in Russian].
8. V. L. Goryachev and A. M. Khodakovskiy, in *Proc. Low-temperature plasma physics (FNTP-95)* (Petrozavodsk, 1995), **2**, pp. 186–188.
9. S. E. Vinogradov, V. V. Rybin, F. G. Rutberg, A. A. Safronov, V. I. Shekalov, V. N. Shiryaev, and V. E. Kuznetsov, *Voprosy Materialovedeniya*. No. 2, 52 (2002).
10. Ph. G. Rutberg, I. I. Kumkova, V. E. Kuznetsov, S. D. Popov, A. Ph. Rutberg, A. A. Safronov, V. N. Shiryaev, and A. V. Surov, in *Proc. PPPS-2007: Pulsed Power and Plasma Science 2007, The 16th IEEE International Pulsed Power Conference and The 34th IEEE International Conference on Plasma Science* (Albuquerque, NM, 2007), pp. 1556–1559.
11. A. V. Budin, M. E. Pinchuk, V. E. Kuznetsov, and F. G. Rutberg, *Technical Physics Letters* **40** (12), 1061 (2014).
12. F. G. Rutberg, *Three-phase plasma torch*; in *Book: Some research questions of gas-discharge plasma and of create a strong magnetic field* (Nauka, Leningradskoe Otdelenie, Leningrad, 1970). P. 8–19 [in Russian].
13. A. A. Kiselev and F. G. Rutberg, *Three-phase plasma torch units*; in *Book: Plasma jet generators and high-current arc* (Nauka Leningradskoe Otdelenie, Leningrad, 1973). P. 31–39 [in Russian].
14. A. A. Kiselev and F. G. Rutberg, *High Temperature.* **12** (4), 827 (1974).
15. F. G. Rutberg, V. S. Borodin, M. A. Grigorev, and A. A. Kiselev, *High Temperature.* **16** (6), 1285 (1978).
16. A. N. Bratsev, M. A. Grigorev, A. A. Safronov, V. N. Fedyukevich, and V. N. Shiryaev, *Complex researching of the electric discharge parameters in three-phase AC plasma torch*; in *Book: Plasma generators and electrical supply systems* (VNIIElectromash, Leningrad, 1985). P. 24–32 [in Russian].
17. A. A. Safronov, R. I. Arabadzhyan, M. A. Grigorev, and V. N. Fedyukevich, *Measuring of the instantaneous power three-phase AC plasma torch*; in *Book: Impulse and short-time supply sources for physical units* (VNIIElectromash, Leningrad, 1985). P. 48–57 [in Russian].
18. R. I. Arabadzhyan, A. A. Safronov, and V. N. Shiryaev, *Plasma torch constructions for rail-gun motion of arcs*; in *Book: Researching of the power plasma generators and of their electrical supply systems* (VNIIElectromash, Leningrad, 1989). P. 11–16 [in Russian].
19. F. G. Rutberg and A. A. Safronov, in *Proc. Forth European Conf. on Thermal Plasma Processes* (Athens, 1996).
20. Ph. G. Rutberg, A. A. Safronov, R. B. Goncharenko, and V. E. Kuznetsov// *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering.* No 4, 114 (1996).
21. Ph. G. Rutberg, A. A. Safronov, S. D. Popov, A. V. Surov, and Gh. V. Nakonechny, *Plasma Physics and Controlled Fusion, Bristol.* **47**, 1681 (2005).
22. Ph. G. Rutberg, A. A. Safronov, S. D. Popov, A. V. Surov, and G. V. Nakonechnyi, *High temperature.* **44** (2), 205 (2006).
23. S. D. Popov, A. Ph. Rutberg, and A. A. Safronov, *High temperature.* **45** (1), 5 (2007).
24. O. B. Vasileva, I. I. Kumkova, A. Ph. Rutberg, A. A. Safronov, and V. N. Shiryaev, *High temperature.* **51** (1), 36 (2013).
25. A. M. Borovskoy, *Usp. Prikl. Fiz.* **1** (4), 450 (2013).
26. A. M. Borovskoy, *Prikl. Fiz.* No. 2, 21 (2014).
27. A. M. Borovskoy, *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (2), 105 (2014).
28. A. M. Borovskoy, *Prikl. Fiz.* No. 4, 40 (2014).
29. A. M. Borovskoy, *Usp. Prikl. Fiz.* **6** (1), 18 (2018).