

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ДУГОВОГО ПЛАЗМОТРОНА

*Iu.V. Murashov*

### SIMULATING THE VORTEX STABILIZATION OF AN ARC PLASMA TORCH

Статья посвящена численному моделированию формирователя вихревой стабилизации электрической дуги и анализу характера потока газа. Рассмотрены математическая модель ламинарного течения и условие турбулизации потока с учетом варьирования расхода плазмообразующего газа. Трехмерная нестационарная математическая модель разработана для реальной геометрии плазматрона и позволяет получить полиномиальные функции распределения скоростей, необходимых для задания граничных условий двухмерной осесимметричной задачи. Цель – создать уточненную математическую модель дугового плазматрона для нанесения покрытий с учетом вихревой стабилизации электрической дуги. Полиномиальные функции позволяют получить распределения скоростей в зависимости от расхода плазмообразующего газа. По результатам моделирования было определено время формирования установившегося потока. Получены значения числа Рейнольдса для плазматрона постоянного тока при варьировании величины расхода плазмообразующего газа.

ПЛАЗМОТРОН; ВИХРЕВАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ; МОДЕЛИРОВАНИЕ; ЛАМИНАРНЫЙ ПОТОК; ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОТОК.

The article is dedicated to numerically simulating the formation of vortex stabilization of an electric arc and to analyzing the gas flow behavior. The three-dimensional model of transient laminar flow is designed for the actual geometry of the plasma torch. Reynolds numbers are presented for varying values of gas flow consumption. The formation time of a steady flow is determined by creating an automatic start algorithm of the plasma torch. The three-dimensional model allows to obtain the distribution of velocities needed for setting the boundary conditions of a two-dimensional axisymmetric task. The general goal of the study is creating a mathematical model of a plasma torch with vortex stabilization of the electric arc.

PLASMA TORCH; VORTEX STABILIZATION; SIMULATION; LAMINAR FLOW; TURBULENT FLOW.

#### Введение

Плазматроны – устройства генерации плазмы, получившие широкое применение в разных областях промышленности за счет эффективной передачи тепла материалам, уникальных свойств и возможностей плазмы [1, 2]. В зависимости от области применения и целевого назначения выделяют следующие типы плазматронов [3]:

плазменный инструмент (устройства для сварки, резки, напыления и т.д.);

металлургические плазматроны (переплавка тугоплавких материалов, получение монокристаллов, дисперсных материалов и т.д.);

плазменные нагреватели (сжигание и переплавка отходов, розжиг топок котлов и т.д.);

плазмохимические реакторы (осуществление химических реакций в плазме).

Разнообразие требований, предъявляемых к плазмотронам и генерируемому плазменному потоку, обусловлено широкой областью применения.

### Особенности технологии плазменного напыления

Технология плазменного напыления – один из основных примеров применения плазмотронов в промышленности. Главные критерии качества напыляемого покрытия – пористость и адгезия [4, 5] – зависят от свойств наносимых материалов и параметров плазменного потока. Обеспечение высокого рабочего ресурса и оптимального плазменного потока – основная технологическая задача при разработке новейших установок плазменного напыления.

Одним из способов стабилизации электрической дуги и управления параметрами плазменного потока является применение газовой стабилизации. Различают два типа газовой стабилизации: осевую и вихревую.

Вихревая стабилизация дуги и плазменного потока реализована в плазмотроне с межэлектродными вставками (МЭВ) ПН-В1 (см. рис. 1, а).

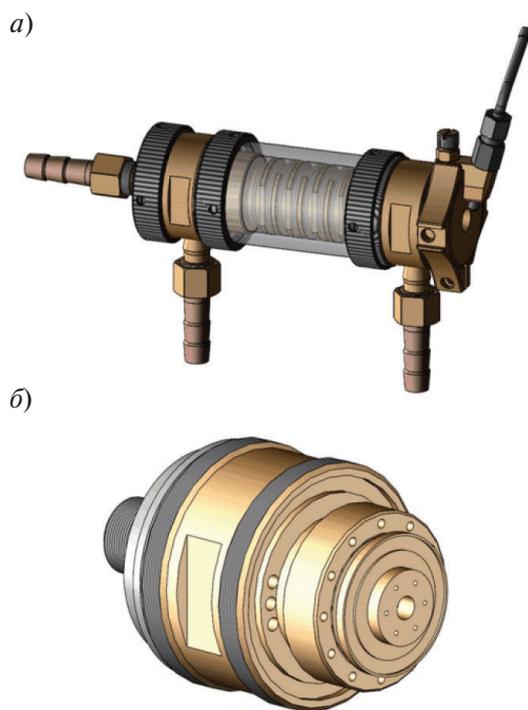


Рис. 1. Конструкция плазмотрона ПН-В1 с межэлектродными вставками: а – внешний вид плазмотрона; б – катодный узел плазмотрона

Формирование тангенциальной закрутки осуществляется с помощью четырехзаходной резьбы в катодной части плазмотрона (см. рис. 1, б).

Тангенциальная закрутка не только позволяет обеспечить стабилизацию дуги, но и выполняет роль заградительного охлаждения, цель которого – изолировать поверхности составных частей конструкции плазмотрона от высокотемпературного газового потока [6–8].

### Электромагнитная газодинамика плазмотрона

Плазмотрон представляет собой систему для выполнения нагрева газового потока, основные подсистемы которой применительно к электромагнитной газодинамической задаче – это электромагнитная и газовая. Три главных фактора отличия моделей электромагнитной газодинамики от уравнений обычной газодинамики [9]: появление нового вида объемных сил (сила Лоренца); выделение джоулева тепла; перенос энтальпии электронами.

Тем самым моделирование плазменных процессов представляет собой мультифизическую задачу, включающую совместное решение задач газодинамики, теплопередачи и электромагнетизма. Кроме представленной явной связи через джоулев нагрев и силу Лоренца, соответствующие уравнения связаны термодинамическими и транспортными свойствами в неявном виде. Данная мультифизическая задача требует значительных вычислительных ресурсов. В случае плазмотрона ПН-В1 можно, исключив катодный узел, использовать осевую симметрию при задании геометрии расчетной области, что значительно снижает требования к вычислительным ресурсам, но для корректного решения задачи необходимо определить граничные условия. В статье с целью корректного задания граничных условий осуществляется моделирование газового потока, формируемого в катодном узле плазмотрона. Данная задача является трехмерной и нестационарной. В качестве программного обеспечения для численного моделирования используется Comsol Multiphysics.

### Моделирование с использованием Comsol Multiphysics

Основная составляющая современного моделирования физических процессов – исполь-

зование методов численного моделирования. Эффективным методом численного моделирования мультифизических процессов служит метод конечных элементов (МКЭ) [10, 11].

Comsol Multiphysics – надежный инструмент для численного исследования, использующий МКЭ с точными линейными решателями.

Математическая модель основана на решении уравнения Навье–Стокса для ламинарного потока, дополненного уравнением непрерывности:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \nabla \cdot \left[ -pI + \mu(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T) \right] + \vec{F}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – скорость потока, м/с;  $p$  – давление, Па;  $I$  – единичная матрица;  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;  $F$  – внешние силы, действующие на поток, Н;

$$\rho \nabla \cdot (\vec{v}) = 0. \quad (2)$$

Применимость модели ламинарного потока обусловлена малым значением числа Рейнольдса (меньше критических значений  $Re_{кр}$  [12, 13]).

Геометрия расчетной области, представляющей собой воздух, заключенный в объеме прикатодной части плазмотрона, и расчетная сетка изображены на рис. 2.

Число конечных элементов сетки – 924493.

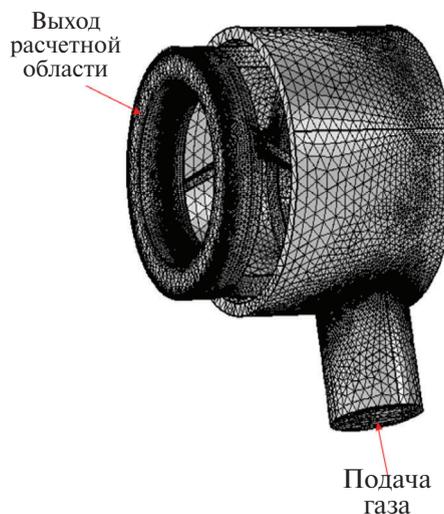


Рис. 2. Геометрия расчетной области

Модель исследовалась при варьировании расхода газа (воздуха) от 0,4 до 2,4 г/с.

Моделируемое время – 2 мс, что достаточно для формирования установившегося потока применительно к данной геометрии.

### Результаты моделирования

По результатам моделирования получены распределения скорости и давления при раз-

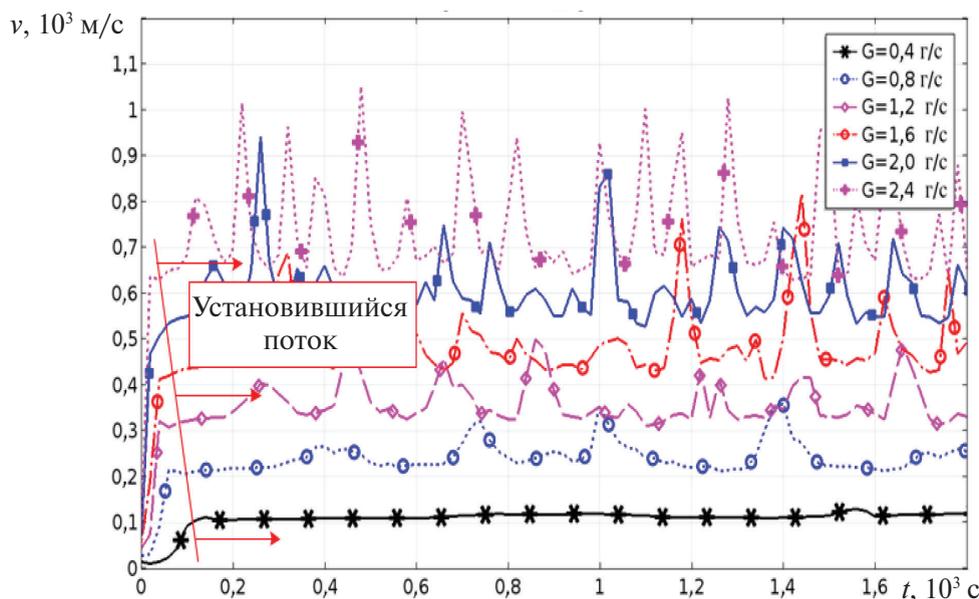


Рис. 3. Графики зависимости максимальной скорости на выходе расчетной области от времени

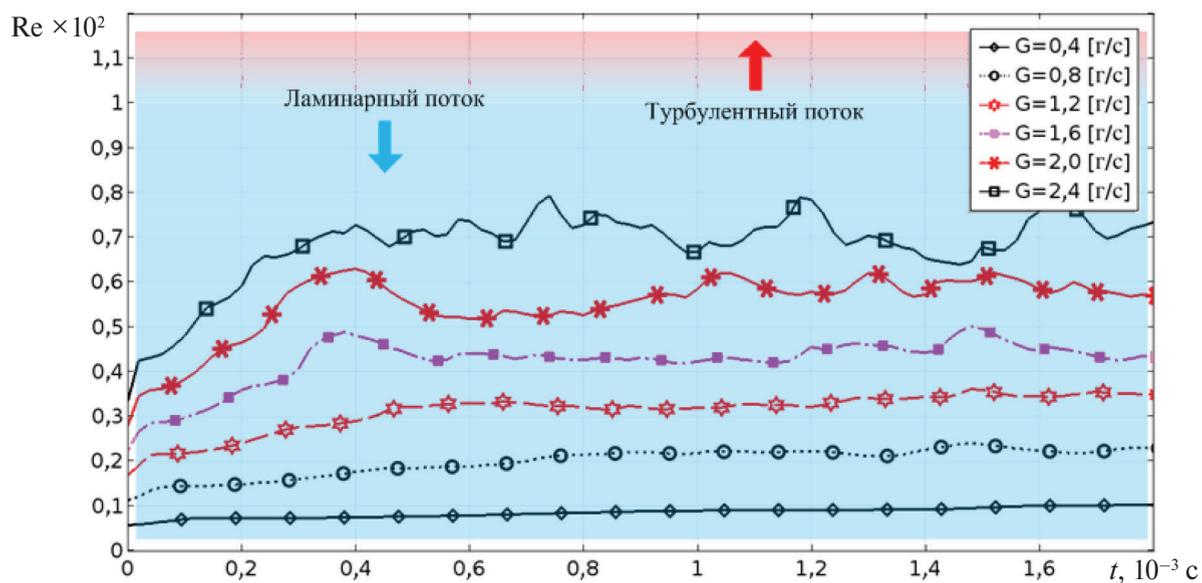


Рис. 4. Графики зависимости числа Рейнольдса от времени

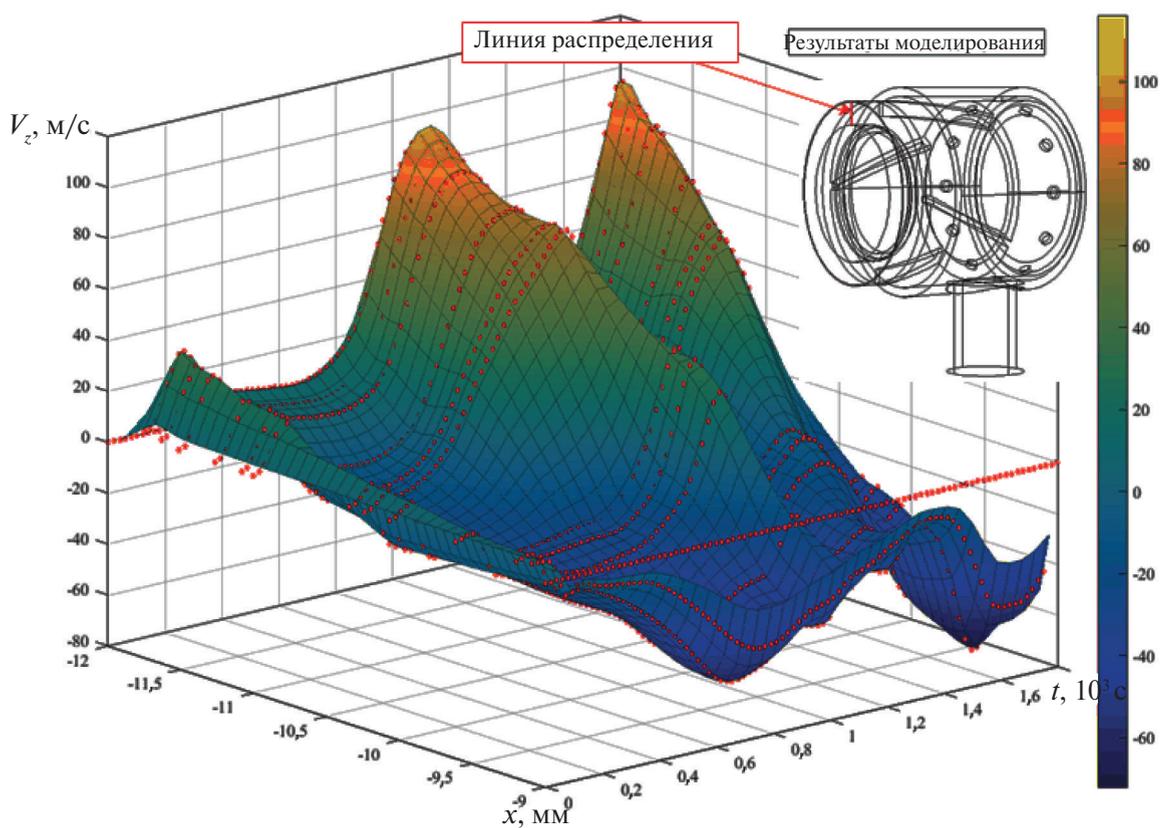
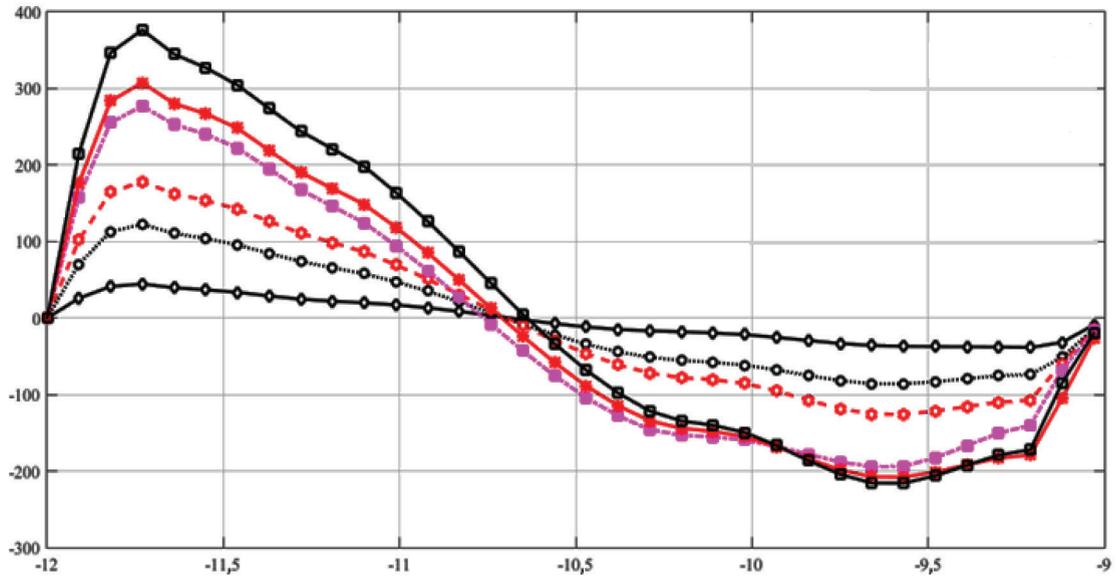


Рис. 5. График распределения скорости  $v_z$  при расходе газа  $0,4 \text{ г/с}$



a)  $V_z, \text{M/c}$



б)

$V_y, \text{M/c}$

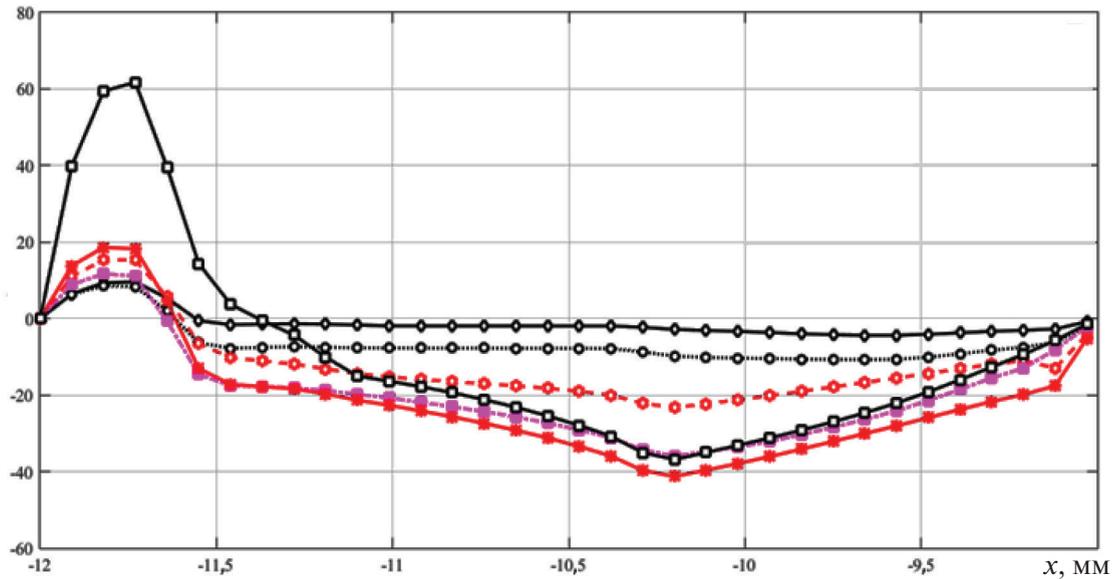


Рис. 6. Графики распределения скоростей  $v_z$  (a) и  $v_y$  (б) при разных расходах газа  $G$ , г/с:  
 —◇—  $G = 0,4$ ; —○—  $G = 0,8$ ; —○—  $G = 1,2$ ; —■—  $G = 1,6$ ; —\*—  $G = 2,0$ ; —□—  $G = 2,4$

личных расходах газа в зависимости от времени. Оценка максимальной скорости на выходе расчетной области (рис. 3) позволяет получить значение времени формирования установившегося потока, которое при минимальном расходе газа составляет 0,1 мс.

Время формирования установившегося потока – важнейший параметр для процесса создания системы автоматического поджига плазмотрона.

С целью оценки корректности выбора математической модели был построен график зависимости числа Рейнольдса от времени (рис. 4), из которого видно, что поток в катодном узле плазмотрона является ламинарным.

Основная задача моделирования – получить распределения осевой и радиальной скоростей как граничных условий для моделирования двухмерной осесимметричной задачи. Осевая скорость плазмотрона в рамках данной задачи –  $v_z$ , а радиальная скорость –  $v_y$  для двухмерной осесимметричной задачи.

Пример распределения скорости  $v_z$  вдоль линии распределения в зависимости от координаты  $x$  и времени при расходе газа 0,4 г/с представлен на рис. 5.

Из графика распределения скорости  $v_z$  (см. рис. 5) видно, что для использования данных условий в качестве граничных для моделирования плазмотрона требуется усреднение по времени. Графики скоростей  $v_z$  и  $v_y$  в зависимости от координаты при разных расходах газа представлены на рис. 6.

Распределение скорости  $v_z$  может быть интерполировано полиномом пятой степени:

$$v_z = a_1x^5 + a_2x^4 + a_3x^3 + a_4x^2 + a_5x + a_6. \quad (3)$$

Коэффициенты полинома для скорости  $v_z$  представлены в табл. 1.

Зависимость коэффициентов полинома для скорости  $v_z$  от расхода газа может быть описана полиномом второй степени

$$a_n = b_1G^2 + b_2G + b_3, \quad (4)$$

где  $G$  – расход газа, г/с. Коэффициенты полинома для выражения (4) представлены в табл. 2.

По аналогии со скоростью  $v_z$  скорость  $v_y$  может быть интерполирована полиномом седьмой степени:

Таблица 1

Коэффициенты полинома для скорости  $v_z$

$G, \text{ г/с}$	$a_1$	$a_2$	$a_3 \cdot 10^2$	$a_4 \cdot 10^3$	$a_5 \cdot 10^4$	$a_6 \cdot 10^4$
0,4	20,7	1087,0	227,4	237,6	123,9	258,1
0,8	41,8	2178,0	452,8	470,1	243,8	505,0
1,2	62,2	3239,0	673,9	700,4	363,5	753,8
1,6	80,5	4164,0	861,0	889,3	458,9	946,3
2,0	102,1	5306,0	1102,0	1143,0	592,0	1225,0
2,4	112,1	5814,0	1205,0	1247,0	644,7	1332,0

Таблица 2

Коэффициенты полинома для выражения (4)

$a_n$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
$a_1$	-5,6	62,6	-4,1
$a_2$	-289,2	3234,0	-194,9
$a_3$	-5942,0	6680,0	-3732,0
$a_4$	-6126,0	689700,0	-35710,0
$a_5$	-315200,0	3557000,0	-170000,0
$a_6$	-647200,0	7328000,0	-321500,0

Таблица 3

Коэффициенты полинома для скорости  $v_y$

$G, \text{ г/с}$	$c_1$	$c_2$	$c_3 \cdot 10^2$	$c_4 \cdot 10^3$	$c_5 \cdot 10^4$	$c_6 \cdot 10^5$	$c_7 \cdot 10^5$	$c_8 \cdot 10^5$
0,4	8,0	577,6	179,5	309,3	319,2	197,4	676,8	992,9
0,8	11,6	842,4	262,2	452,7	468,2	290,0	996,4	1465,0
1,2	21,0	1529,0	477,4	826,8	857,6	532,8	1836,0	2707,0
1,6	20,8	1513,0	471,7	815,7	844,8	524,0	1803,0	2653,0
2,0	29,6	2162,0	675,8	1171,0	1216,0	756,4	2609,0	3851,0
2,4	38,1	2765,0	858,7	1479,0	1526,0	942,6	3230,0	4736,0

Таблица 4

Коэффициенты полинома для выражения (6)

$C_n$	$e_1$	$e_1$
$c_1$	14,6	1,0
$c_2$	1063,0	76,9
$c_3$	33080,0	2444,0
$c_4$	570900,0	43190,0
$c_5$	5903000,0	455100,0
$c_6$	36550000,0	2889000,0
$c_7$	125500000,0	10150000,0
$c_8$	184400000,0	15220000,0

$$v_y = c_1x^7 + c_2x^6 + c_3x^5 + c_4x^4 + c_5x^3 + c_6x^2 + c_7x + c_8. \quad (5)$$

Коэффициенты полинома для скорости  $v_y$  представлены в табл. 3.

Зависимость коэффициентов полинома для скорости  $v_y$  от расхода газа по аналогии со скоростью  $v_z$  может быть описана полиномом первой степени

$$c_n = e_1G + e_2. \quad (6)$$

Коэффициенты полинома для выражения (6) представлены в табл. 4.

### Заключение

Численное моделирование формирователя вихревой стабилизации дуги позволяет определить характер потока и граничные условия для

моделирования двухмерной осесимметричной мультифизической задачи. Было установлено, что во всем используемом диапазоне расхода газа от 0,4 до 2,4 г/с поток является ламинарным.

Результаты моделирования позволяют определить время формирования установившегося потока, которое необходимо знать при создании алгоритма пуска плазматрона.

Получены усредненные во времени зависимости  $v_z$  и  $v_y$  от координаты. Использование полученных интерполяционных полиномиальных функций позволяет определить распределения  $v_z$  и  $v_y$  при любом значении расхода газа из диапазона 0,4–2,4 г/с. Разработанная трехмерная нестационарная модель дает возможность учесть вихревую стабилизацию электрической дуги в прикатодной области.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фролов В.Я., Дресвин С.В., Лисенков А.А.** Электротехнологические промышленные установки. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2010. 752 с.
2. **Донской А.В., Клубник В.С.** Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1979. 221 с.
3. **Эсибиян Э.М.** Плазменно-дуговая аппаратура. Киев: Техника, 1971. 164 с.
4. **Юшин Б.А.** Разработка воздушно-плазменной электротехнологии нанесения защитно-декоративных покрытий: Дисс. ... канд. техн. наук. / СПбГПУ, 2010. 168 с.
5. **Frolov V., Petrov G., Yushin B., Dubov M., Churkin I., Ivanov D.** Research and development of plasma technologies of spraying of coatings //Proc. 18th Symposium on Physics of Switching Arc. Nové Město na Moravě. Czech Republic. 2009. P. 162–165.
6. **Фролов В.Я.** Техника и технологии нанесения покрытий. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. 387 с.
7. **Жуков М.Ф.** Экспериментальные исследования плазмотронов. Новосибирск: Наука, 1977. 392 с.
8. **Аньшаков А.С., Жуков М.Ф., Косинов В.А., Рудакова В.А., Янковский А.И.** Исследование массообмена дуги, стабилизированной вихрем, с окружающим газом // Генераторы низкотемпературной плазмы: VII всесоюз. конф.: Алма-Ата, 1977. Т. 1. С. 179–182.
9. **Калихман Л.Е.** Элементы магнитной газодинамики. М.: Атомиздат, 1964. 423 с.
10. **Красников Г.Е., Нагорнов О.В., Старостин Н.В.** Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics. М.: Изд-во НИЯУ МИФИ, 2012. 184 с.
11. **Сегерлинд Л.** Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 393 с.
12. **Жуков М.Ф.** Физика дугового разряда (сборник трудов). Новосибирск. 1972. 157 с.
13. **Белов И.А., Исаев С.А.** Моделирование турбулентных течений. СПб.: Изд-во Балт. гос. техн. ун-та, 2001. 108 с.

## REFERENCES

1. **Frolov V.Ya., Dresvin S.V., Lisenkov A.A.** Elektrotehnologicheskiye promyshlennyye ustanovki. [Electrotechnological industrial installations.] St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2010. 752 s. (rus)
2. **Donskoy A.V., Klubnikin V.S.** Elektroplazmennyye protsessy i ustanovki v mashinostroyenii. [Electro-plasma processes and installations in mechanical engineering]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1979. 221 s. (rus)
3. **Esibiyan E.M.** Plazmenno-dugovaya apparatura. [Plasma arc equipment]. Kiyev: Tekhnika, 1971. 164 s. (rus)
4. **Yushin B.A.** Razrabotka vozduшно-plazmennoy elektrotehnologii naneseniya zashchitno-dekorativnykh pokrytiy: Diss. ... kand.tekhn.nauk [Development of air-plasma technology of spraying of protective and decorative coatings.] St.Petersburg: SPbGPU Publ., 2010. 168 s. (rus)
5. **Frolov V., Petrov G., Yushin B., Dubov M., Churkin I., Ivanov D.** Research and development of plasma technologies of spraying of coatings. *Proc. 18th Symposium on Physics of Switching Arc. Nové Město na Moravě, Czech Republic.* 2009 P. 162–165.
6. **Frolov V.Ya.** Tekhnika i tekhnologii naneseniya pokrytiy. [Coating technique and technology]. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2008. 387 s. (rus)
7. **Zhukov M.F.** Eksperimentalnyye issledovaniya plazmotronov. [Experimental studies of plasma torches]. Novosibirsk: Nauka, 1977. 392 s. (rus)
8. **Anshakov A.S., Zhukov M.F., Kosinov V.A., Rudakova V.A., Yankovskiy A.I.** Issledovaniye massoobmena dugi, stabilizirovannoy vikhrem, s okruzhayushchim gazom. [Study of mass arc transfer, vortex stabilized, with the surrounding gas.]. *Generatory nizkotemperaturnoy plazmy: VII vsesoyuz. konf.* Alma-Ata, 1977. T.1. S. 179–182. (rus)
9. **Kalikhman L.Ye.** Elementy magnitnoy gazodinamiki. [Elements of magnetic gas dynamics]. Moscow: Atomizdat, 1964. 423 s. (rus)
10. **Krasnikov G.Ye., Nagornov O.V., Starostin N.V.** Modelirovaniye fizicheskikh protsessov s ispolzovaniyem paketa Comsol Multiphysics. [Simulation of physical processes using Comsol Multiphysics package]. Moscow: Izd-vo NIYaU MIFI, 2012. 184 s. (rus)
11. **Segerlind L.** Primeneniye metoda konechnykh elementov. [Application of Finite Element Method]. Moscow: Mir, 1979. 393 s. (rus)
12. **Zhukov M.F.** Fizika dugovogo razryada (sbornik trudov). [Arc physics (Proceedings)]. Novosibirsk, 1972. 157 s. (rus)
13. **Belov I.A., Isayev S.A.** Modelirovaniye turbulentnykh techeniy. [Simulation of turbulent flows]. St.Petersburg: Izd-vo BSTU, 2001. 108 s. (rus)

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS**

**МУРАШОВ Юрий Васильевич** – ассистент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: iurimurashov@gmail.com

**MURASHOV Iurii V.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: iurimurashov@gmail.com