

Численное моделирование дугового плазмотрона постоянного тока с учетом явлений неустойчивости плазменного потока

КАДЫРОВ А.А., ФРОЛОВ В.Я., МУРАШОВ Ю.В.

Разработаны нестационарные математические модели дугового плазмотрона с межэлектродными вставками с вихревой стабилизацией и осевой подачей плазмообразующего газа с учетом явлений неустойчивости плазменного потока в программном продукте Comsol Multiphysics. Произведен анализ физических явлений, влияющих на устойчивость плазменного потока. Согласно анализу полученных данных были установлены факторы, влияющие на стабильность плазменного потока, а также установлено их взаимовлияние с целью компенсации развития неустойчивости потока. Произведено уточнение значений критического числа Рейнольдса путем сопоставления результатов численного моделирования верифицированной математической модели в идентичных режимах работы дугового плазмотрона с проведенными экспериментальными исследованиями. В результате исследования критическое значение числа Рейнольдса для конструкции плазмотрона ПН-В1 составляет 267 и 212 при использовании источников питания АПР-403 и АПР-404 соответственно.

К л ю ч е в ы е с л о в а: плазмотрон постоянного тока, плазменный поток, неустойчивость, математическая модель, вихревая стабилизация

Технология плазменного напыления – ряд процессов нанесения различных видов покрытий. Источники энергии необходимы для нагрева материала покрытия (в виде порошка или проволоки) в расплавленном или частично расплавленном состоянии. Процесс ускоряется в направлении подготовленной поверхности с помощью либо газа, обычно это аргон или воздух, либо распыленной струи. Основные критерии качества напыляемого покрытия, которыми являются адгезия и пористость [1], зависят от свойств материалов и характеристики плазменного потока. Именно поэтому главной технологической задачей при разработке новых плазменных установок для напыления является получение оптимальных параметров потока и режимов работы плазмотрона, обеспечивающих высокий рабочий ресурс его конструктивных элементов. Численное моделирование позволяет решить технологическую задачу при минимуме затрат и сравнить полученные результаты с экспериментальными данными.

Причины появления флуктуации в плазменной дуге. С учетом данных [2, 3] флуктуации в плазменном потоке, возникающие в низкотемпературной плазме с электрическим током, можно разделить на два вида: тепловые, связанные с джоулевым тепловыделением, и силовые, связанные с флуктуацией импульса. Неустойчивости импульса соответствует случай, когда флуктуация проводимости, а следовательно, и джоулева тепловыделения, приводит к колебаниям давления. Логично начинать анализ неустойчивости плазменного по-

тока с рассмотрения простейшей модели – газодинамической.

Выражения (1) и (2), описывающие газодинамические процессы, неустойчивы для течений с ускорением на границе раздела двух сред с высоким градиентом температуры, а как следствие, плотности плазмы (неустойчивость Релея–Тейлора) и относительно сдвиговых течений (неустойчивость Кельвина–Гельмгольца):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0; \quad (1)$$

$$\rho d\vec{v} / dt = / \text{grad}(p). \quad (2)$$

Неустойчивость Кельвина–Гельмгольца обусловлена существованием сдвиговых перемещений. Причины возникновения неустойчивости следующие: рост поперечной скорости границы раздела u ; сужение трубок тока (газовая динамика); снижение давления; рост скорости u .

Существует также конвективная неустойчивость, которая возникает из-за разницы значений плотностей, зависящих от температуры, и следовательно, связана с неравномерностью нагретого слоя. Таким образом, данный механизм развития неустойчивости аналогичен механизму неустойчивости Релея–Тейлора.

Существуют способы регулирования гидродинамической неустойчивости в плазме с магнитным полем, если проводник будет двигаться в поперечном направлении относительно линий индукции магнитного поля, что происходит из-за возникновения тормозящих сил (магнитная вязкость). Усло-

вие существенного влияния магнитного поля на стабильность плазменного потока:

$$\text{Re}_m \gg 1, \text{Re}_m = v_0 L_0 \mu_0 \sigma, \quad (3)$$

где v_0 – характерная скорость; L_0 – характерный размер; $1/\mu_0 \sigma$ – магнитная вязкость.

Основные критерии возникновения турбулентности, являющиеся основными для плазмы и вязкой жидкости [2, 4]:

спектры пульсационных полей различных величин (скорости, температуры, давления, потенциала и др.) – непрерывные;

коэффициенты корреляций пульсаций любых величин в двух точках потока или в одной точке, но в разные моменты времени стремятся к нулю при увеличении пространственного или временного сдвига;

характеристики течения обнаруживают чувствительную зависимость от малого изменения начальных условий.

Придерживаясь статистического описания турбулентности (более подробное описание представлено в книге), флуктуации в плазменном потоке можно разбить на поперечные и продольные, что является главным отличием от описания турбулентности в жидкости, в котором из-за несжимаемости последней предполагается возможным наличие лишь поперечных (вихревых) пульсаций.

Математическая модель. С помощью математического моделирования нестационарных процессов в дуговом плазмотроне становится возможным описание возникновения неустойчивости плазменного потока с решением мультифизической задачи при использовании уравнений гидродинамики, теплопередачи и электромагнетизма [5]. Математическая модель содержит следующие главные допущения:

плазма находится в состоянии локального термодинамического равновесия (ЛТР);

поток является ламинарным;

плазма является оптически тонкой;

действием силы тяжести пренебрегаем;

рассмотрена двумерная осесимметричная задача;

термодинамические и транспортные свойства зависят от температуры;

не учитываются приэлектродные процессы.

Основные уравнения, описывающие нестационарные процессы в дуговом плазмотроне:

система уравнений Максвелла

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= \vec{J}; \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \\ \nabla \times \vec{D} &= q; \end{aligned}$$

$$\nabla \times \vec{B} = 0; \quad (4)$$

уравнение движения

$$\rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \nabla \left[-pI + \mu(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \vec{v})I \right] + [\vec{J} \times \vec{B}]; \quad (5)$$

уравнение непрерывности

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0; \quad (6)$$

уравнение баланса энергии

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \sigma E^2 - u_{rad} + \nabla \cdot \left(\frac{\lambda}{c_p} \nabla H \right). \quad (7)$$

Результаты численного моделирования работы дугового плазмотрона с осевой подачей плазмообразующего газа. Одним из основных результатов численного моделирования работы дугового плазмотрона является распределение температуры, которое позволяет идентифицировать флуктуации потока плазмы. Распределение температуры при расходе плазмообразующего газа 0,55 г/с в различные моменты времени показано на рис. 1

Разработанная нестационарная математическая модель позволяет учесть в качестве входного параметра характеристику тока, т.е. влияние источника питания на стабильность плазменного потока. Кроме того, модель позволяет варьировать расход плазмообразующего газа и учитывать влияние конструктивных особенностей плазмотрона. Характеристики тока представлены на рис. 2.

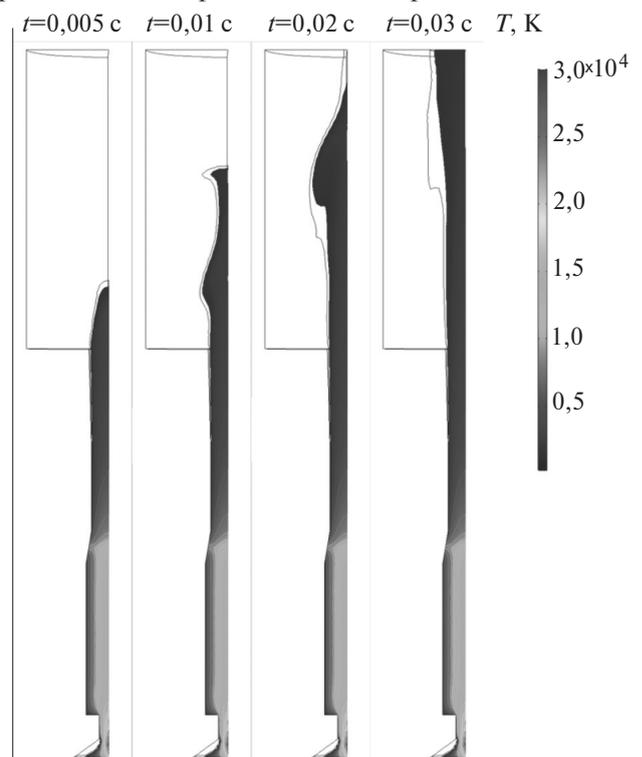
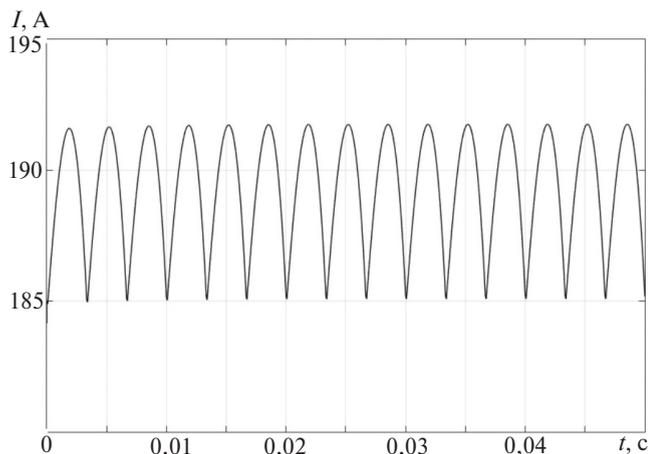
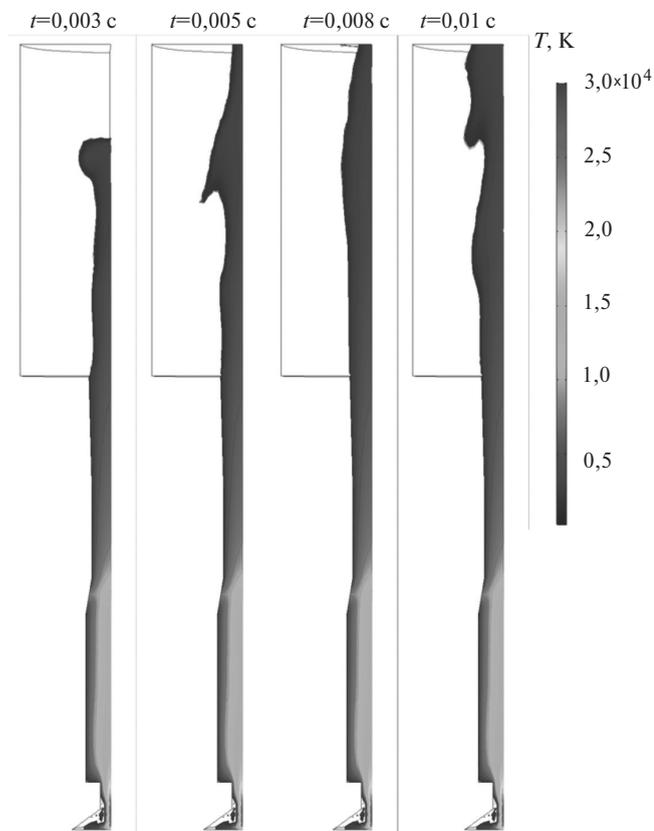


Рис. 1. Распределение температуры, $G = 0,55 \text{ г/с}$

Рис. 2. График зависимости $I = f(t)$

Согласно результатам численного моделирования работы дугового плазмотрона при расходе плазмообразующего газа 0,55 г/с и характеристике тока, соответствующей источнику питания АПР-404, время формирования установившегося плазменного потока составляет примерно 0,026 с, а число Рейнольдса – 72.

Влияние источника питания (т.е. развитие неустойчивости, обусловленной джоулевым тепловыделением) на стабильность плазменного потока начинает проявляться при развитии силовой неустойчи-

Рис. 3. Распределение температуры, $G = 2G$ г/с

вости, связанной с флуктуацией импульса при увеличении расхода плазмообразующего газа. Данное явление особенно отчетливо проявляется при численном моделировании работы дугового плазмотрона с расходом плазмообразующего газа 2 г/с. Распределение температуры при таком расходе в различные моменты времени при характеристике тока, приведенной на рис. 1, представлено на рис. 3.

Согласно результатам численного моделирования работы дугового плазмотрона при режиме с расходом плазмообразующего газа 2 г/с и $I = f(t)$ время формирования установившегося плазменного потока составляет примерно 0,004 с, а число Рейнольдса – 474.

Сравнение результатов численного моделирования работы дугового плазмотрона с осевой подачей плазмообразующего газа и плазмотрона с вихревой стабилизацией дуги представлено на рис. 4.

Анализ результатов моделирования показал, что вихревая стабилизация дуги оказывает сильное влияние на распределение температуры в прикатодной области – дуга становится более сжатой, что приводит к развитию неустойчивости перегрева. Однако разница между распределениями температуры за прикатодным сужением в направлении анода при вихревой стабилизации дуги и осевой подаче плазмообразующего газа минимальна. Это позволяет при реализации математической модели сделать допущение о равномерной подаче плаз-

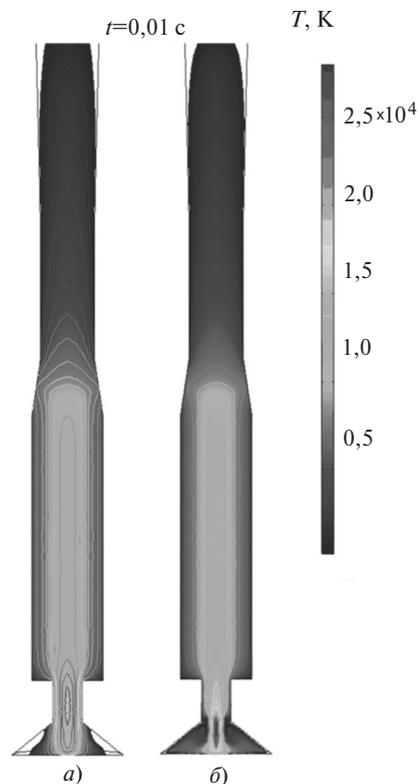


Рис. 4. Распределение температуры: а – математическая модель с осевой подачей плазмообразующего газа; б – математическая модель с вихревой стабилизацией дуги

образующего газа в случае изучения плазменного потока на выходе плазматрона, тем самым значительно сократив время, требуемое для численного моделирования.

Результаты моделирования показывают, что в случае плазматрона с вихревой стабилизацией температура в пристеночной области прикатодной части плазматрона значительно ниже, чем у плазматрона с осевой подачей газа, что позволяет увеличить эксплуатационный ресурс оборудования.

Результаты экспериментальных исследований. Одна из основных целей проведения экспериментальных исследований – оценка влияния характеристик источника питания на стабильность плазменного потока. В результате были проведены исследования идентичных режимов работы плазматрона при питании от разных источников. Выявлено, что при питании от источника АПР-403, обладающего более сглаженной характеристикой тока в сравнении с АПР-404, пульсации падения напряжения на дуге значительно ниже, чем в случае с источником питания АПР-404. Для количественной оценки пульсаций падения напряжения используется коэффициент пульсаций.

$$k = 1 - \frac{U_{\min}}{U_{\max}}. \quad (8)$$

Коэффициент пульсаций падения напряжения на дуге для источника питания АПР-403 составляет 0,16, а для источника питания АПР-404 – 0,49 при расходе плазмообразующего газа 0,55 г/с. Представленные выше значения коэффициента пульсаций демонстрируют, что при работе от источника питания АПР-403 плазменный поток является более стабильным. Согласно результатам исследования для технологии плазмотермического напыления целесообразно применять в качестве источника питания АПР-403, обеспечивающего стабильный плазменный поток.

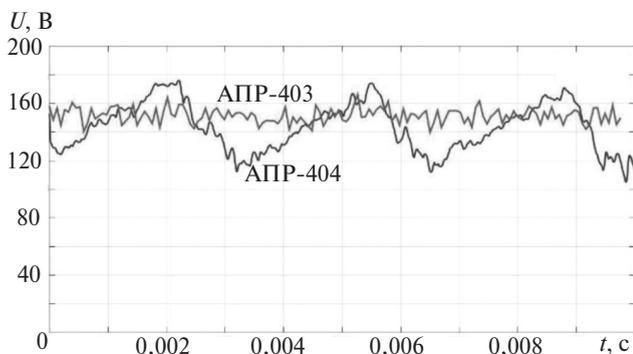


Рис. 5. Временные зависимости падения напряжения на дуге при использовании источников питания АПР-403 и АПР-404

Методики проведения экспериментальных исследований позволяют получить следующие данные о плазменном потоке:

характеристики тока и напряжения на электрической дуге;

уровень шума во времени, определяемый градиентом давления;

интенсивность светового излучения во времени; радиальное распределение температуры.

Экспериментальные данные позволяют оценить стабильность плазменного потока и влияние характеристик источников питания. Согласно полученным результатам целесообразно рекомендовать источник питания АПР-403 в качестве основного для плазматрона ПН-В1, что позволяет получить более стабильный плазменный поток. Тем самым улучшаются характеристики напыляемого покрытия и повышается коэффициент полезного действия технологического процесса плазмотермического нанесения покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. Nový Mlýnský náhon (Czech Republic), 7–11 Sept. 2009, pp. 162–165.
2. Мони́н А.С. Гидродинамическая неустойчивость. Успехи физических наук, 1986, т. 150, вып. 1, с. 61–105.
3. Фролов В.Я., Лисенков А.А., Барченко В.Т. Физические основы применения низкотемпературной плазмы: Учебное пособие для вузов. Санкт-Петербургский политехнический университет, 2010.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т.6. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986, 3-е изд., 736 с.
6. Фролов В.Я., Дубов М.В., Юшин Б.А. Анализ теплового состояния струйных плазматронов. – Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2009, № 78, с. 125–129.

[19.02.2018]

А в т о р ы: **Кадыров Арслан Алмазович** окончил Санкт-Петербургский политехнический университет (СПбПУ) в 2016 г. Аспирант кафедры «Электротехника и электроэнергетика» СПбПУ Петра Великого.

Фролов Владимир Яковлевич окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института в 1974 г. В 2004 г. защитил докторскую диссертацию. Зав. кафедрой «Электротехника и электроэнергетика» СПбПУ Петра Великого.

Мурашов Юрий Васильевич окончил СПбПУ в 2013 г. Доцент кафедры «Электротехника и электроэнергетика» СПбПУ Петра Великого.

Numerical Simulation of a DC Arc Plasmatron Taking into Account the Plasma Flux Instability Phenomena

KADYROV Arslan A. (*Peter Great St. Petersburg Polytechnic University «SPbPU»*), Saint-Petersburg, Russia) – *PhD Student*

FROLOV Vladimir Ya. (*Peter Great St. Petersburg Polytechnic University «SPbPU»*), Saint-Petersburg, Russia) – *Professor, Dr. Sci. (Eng.)*

MURASHOV Yuri V. (*Peter Great St. Petersburg Polytechnic University «SPbPU»*), Saint-Petersburg, Russia) – *Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)*

Unsteady mathematical models of an arc plasmatron involving inter-electrode inserts with vortex stabilization and axial supply of plasma-producing gas, and taking into account the plasma flux instability phenomena are developed in the Comsol Multiphysics software environment. The physical phenomena influencing the plasma flux stability are analyzed. Based on an analysis of the obtained data, factors influencing the plasma flux stability have been determined along with their mutual influence with a view to compensate for the onset of flow instability. The Reynolds number critical values have been determined more exactly by comparing the numerical simulation results obtained from the verified mathematical model in the identical operation modes of an arc plasmatron with the data from the performed experimental investigations. The study results have shown that the Reynolds number critical value for the Type PN-VI plasmatron is equal to 267 and 212 in the cases of using the Type APR-403 and Type APR-404 power supplies, respectively.

Key words: *DC plasmatron, plasma flux, instability, mathematical model, vortex stabilization*

REFERENCES

1. **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. Novii Mmsto na Moravm (Czech Republic), 7–11, Sept 2009, pp. 162–165.
2. **Monin A.S.** *Uspekhi fizicheskikh nauk – in Russ. (Physical sciences successes)*, vol. 150, iss. 1, pp. 61–105.
3. **Frolov V.Ya., Lisenkov A.A., Barchenko V.T.** *Fizicheskiye osnovy primeneniya nizkotemperaturnoi plazmy: Uchebnoye pos. dlya vuzov* (Physical bases of low-temperature plasma application:

Tutorial for higher educational institutions). St. Petersburg State Polytechnic University, 2010.

4. **Landau L.D., Lifshits Ye.M.** *Teoreticheskaya fizika. Tom 6. Gidrodinamika* (Theoretical Physics. Vol. 6. Hydrodynamics). Moscow, Publ. «Nauka», 1986, 736 p.

5. **Frolov V.Ya., Dubov M.V., Yushin B.A.** *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGSPU – in Russ. (Scientific and technical registers of the St. Petersburg State Polytechnic University)*, 2009, No. 78, pp. 125–129.

[19.02.2018]