

## Математические модели плазменных электротехнологических процессов

ФРОЛОВ В.Я., ИВАНОВ В.Н., ИВАНОВ Д.В.

*На кафедре «Электротехника и электроэнергетика» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого выполняются разработки различных плазменных электротехнологических процессов с применением методов математического моделирования. Представлена базовая математическая модель для расчета плазменных электротехнологических процессов и приведены результаты расчета по разработанным моделям воздушно-дугового плазматрона для нанесения покрытий; высокочастотного индукционного плазматрона для очистки кремния; комбинированного плазматрона для получения наноматериалов; плазменной струи, загруженной мелкодисперсным порошком; аргоно-дуговой сварки и плазменной сварки. Полученные при математическом моделировании результаты подтверждаются экспериментальными исследованиями, что позволяет говорить об адекватности разработанных моделей.*

*Ключевые слова: электротехнологии, плазменные процессы, плазматроны, математическое моделирование, распределение температуры*

Электротехнологические процессы с использованием дуговых и высокочастотных индукционных (ВЧИ) плазматронов в настоящее время широко применяются как у нас в стране, так и за рубежом. На основе этих процессов созданы технологии воздушно-плазменного нанесения покрытий, обработки мелкодисперсного порошка с различными целями, сварки и резки металлов и др. [1, 2].

В плазменных электротехнологических процессах технологическим инструментом является плазма, основные параметры которой — температура и скорость.

При разработке и оптимизации плазменного оборудования необходимо определить, как зависит эффективность (производительность) процесса от геометрии устройства и режима его работы. Материальные и временные затраты можно существенно сократить, если в дополнение к экспериментальным методам исследований использовать математическое моделирование плазменных электротехнологических процессов.

**Описание математической модели.** К настоящему моменту разработаны довольно сложные модели плазменных процессов с нарушением термического и химического равновесия [3, 4], с учетом турбулентности плазмы [5–7] и др. В базовой модели используются следующие допущения для плазмы:

находится в состоянии локального термодинамического равновесия;

характерна ламинарность, турбулентностью пренебрегается;

применяется модель оптически тонкой плазмы.

Основные уравнения, входящие в базовую модель, выражают фундаментальные законы сохранения (энергии, импульса, массы) и записываются следующим образом [8]:

уравнение баланса энергии

$$\nabla(\rho\bar{v}h) = \sigma E^2 - u_{rad} + \nabla\left(\frac{\lambda}{c_p}\nabla h\right); \quad (1)$$

уравнение движения

$$\nabla(\rho\bar{v}\bar{v}) = -\nabla p + \bar{F}_B + \rho\bar{g} + \nabla(\mu\nabla\bar{v}); \quad (2)$$

уравнение неразрывности

$$\nabla(\rho\bar{v}) = 0. \quad (3)$$

В (1)–(3) входят:

параметры плазмы:  $h$  — энтальпия, однозначно связанная с температурой  $T$ ;  $\bar{v}$  — скорость;  $p$  — давление;

теплофизические свойства плазмы:  $\rho$  — плотность;  $\sigma$  — электропроводность;  $u_{rad}$  — удельная мощность излучения;  $\lambda$  — теплопроводность;  $c_p$  — удельная теплоемкость;  $\mu$  — вязкость;

параметры, характеризующие электромагнитное поле:  $E$  — напряженность электрического поля;  $\bar{F}_B = \bar{J} \times \bar{B}$  — электромагнитная сила.

Существование плазмы обусловлено выделением в среде электрической мощности, поэтому система уравнений (1)–(3) дополняется электромагнитными уравнениями Максвелла:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad \nabla \vec{E} = \frac{\rho_{el}}{\varepsilon_0}; \\ \nabla \times \vec{H} &= \vec{J}; \quad \nabla \vec{B} = 0,\end{aligned}$$

где  $\vec{E}$  – вектор напряженности электрического поля;  $\vec{H}$  – вектор напряженности магнитного поля;  $\vec{B}$  – вектор магнитной индукции;  $\vec{J}$  – вектор плотности тока;  $\rho_{el}$  – объемная плотность электрических зарядов;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная.

Для термических плазменных процессов уравнения Максвелла сводятся к уравнениям для скалярного ( $\varphi$ ) и векторного ( $\vec{A}$ ) потенциалов:

$$\begin{aligned}\nabla(\sigma \nabla \varphi) &= 0; \\ \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \nabla \vec{A} &= \vec{J},\end{aligned}\quad (4)$$

где  $\vec{J} = \sigma(-\nabla \varphi + \vec{v} \times \vec{B})$ ;  $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ .

Система (1)–(4) должна быть решена совместно с целью получения распределений искомых величин: температуры плазмы, ее скорости, давления, а также характеристик электромагнитного поля. Размер расчетной области определяется областью существования плазмы. На каждой границе расчетной области должны быть заданы граничные условия для каждой искомой величины.

Для того чтобы решить систему (1)–(4), необходимо знать теплофизические свойства плазмы, которые зависят от ее состава, температуры и давления. Методика расчета свойств плазмы представлена в [9–11].

Существует ряд программных пакетов, позволяющих моделировать плазменные электротехнологические процессы. К наиболее известным относятся ANSYS (CFX, Fluent) и Comsol Multiphysics [12]. Достоинства этих программ: широта применения, относительная простота и высокая производительность рабочего процесса.

Необходимо заметить, что в вышеназванных программах обычно нет готовых моделей плазменных процессов. Однако в них существует возможность дополнять существующие модели собственным кодом. Например, в программном пакете ANSYS Fluent существует возможность добавлять свои функции UDF (user defined functions), написанные на языке программирования C. Это позволяет сосредоточиться на детальном описании особенностей именно плазменных электротехнологических процессов, пользуясь при этом готовыми процедурами для решения газодинамических уравнений.

**Воздушно-дуговой плазмотрон для нанесения покрытий.** Плазменные технологии нанесения износостойких, восстанавливающих, коррозион-

но-стойких, термозащитных, электроизоляционных, защитно-декоративных и других покрытий широко применяются в мире. На рис. 1 показан процесс воздушно-плазменного нанесения покрытий [13–16]. При разработке дуговых плазмотронов и процессов воздушно-плазменного нанесения покрытий использовались методы математического моделирования.

Была разработана двумерная осесимметричная модель плазменных процессов в воздушно-дуговом плазмотроне ПН-31 с межэлектродной вставкой



Рис. 1

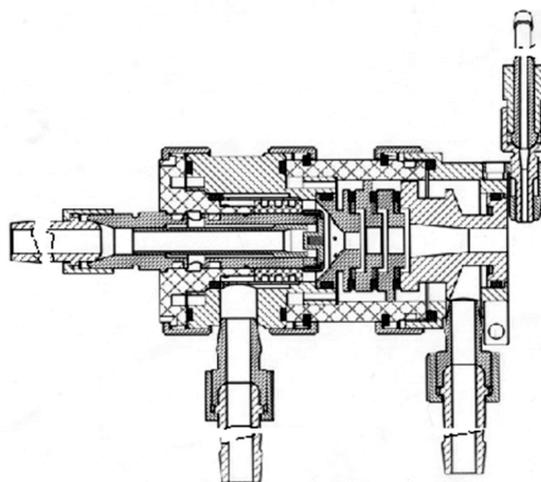


Рис. 2

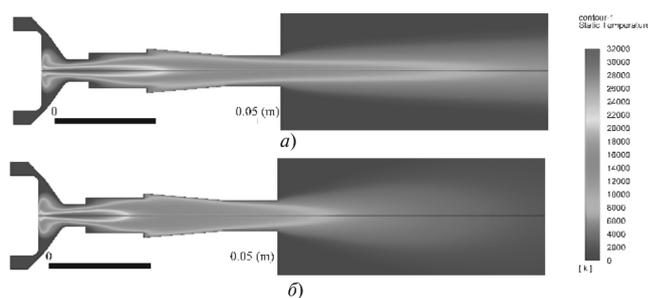


Рис. 3



Рис. 4

для нанесения покрытий [14]. Геометрия плазмотрона представлена на рис. 2. Расчетная сетка состоит из 29198 элементов.

Были исследованы две модели: модель ламинарного потока и модель турбулентного потока плазмы (SST-модель). Распределения температуры плазмы (напряжение на дуге 150 В) для ламинарного и турбулентного потока показаны на рис. 3.

Как видно из рис. 3, максимальная температура плазмы, полученная в обеих моделях, составляет около 32000 К. Однако форма распределения температуры плазмы в случае модели турбулентной плазмы оказывается ближе к результатам высокоскоростной видеосъемки, что показывает фотография струи плазмы дугового плазмотрона для напыления на рис. 4 [17].

**ВЧИ плазмотрон для очистки кремния.** Проводились исследования ВЧИ плазменного процесса очистки кремния от легкоплавких примесей для полупроводниковой промышленности [18]. Эффект очистки достигается пропусканием мелкодисперсного порошка кремния через плазменный факел ВЧИ плазмотрона. За счёт высокой температуры (8000–10000 К) плазмы в ВЧИ плазмотроне легкоплавкие примеси, содержащиеся в подвергаемом очистке кремнии, испаряются и уносятся потоком плазмы.

Параметры плазмотрона и режим его работы: диаметр разрядной камеры 60 мм; частота тока индуктора 1,76 МГц; мощность в плазме 30 кВт; расход газа 25 л/мин; плазмообразующий газ – смесь аргона с водородом (99% Ar + 1% H<sub>2</sub>); подача газа – сверху вниз. Добавка водорода необходима для повышения энтальпии плазмы, чтобы обработка

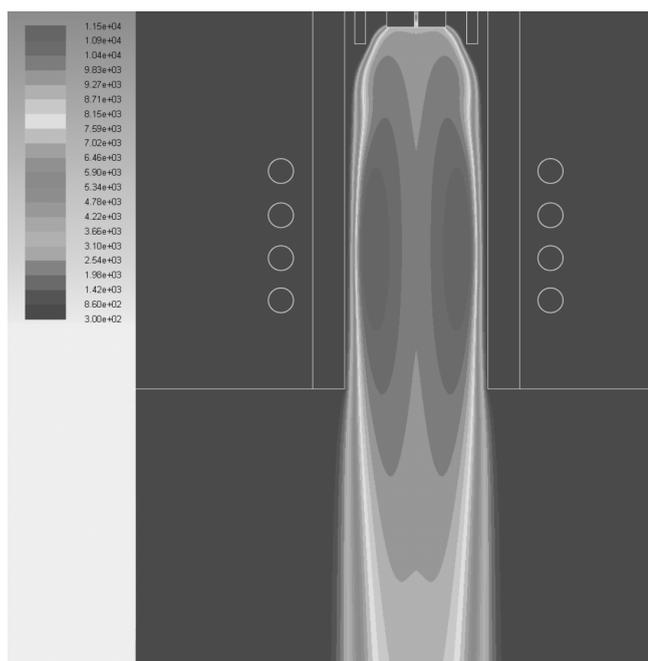


Рис. 5

мелкодисперсного порошка проходила более эффективно.

Результаты расчета (распределение температуры, К) показаны на рис. 5.

**Комбинированный плазмотрон для получения наноматериалов.** Комбинированный плазмотрон состоит из последовательно соединенных дугового струйного плазмотрона и ВЧИ плазмотрона. При этом струя дугового плазмотрона подается на вход ВЧИ плазмотрона (см. рис. 6, слева — режим работы без ВЧИ разряда, а справа — с ВЧИ разрядом) [19–21]. Этим достигается поджиг ВЧИ плазмы и снижение мощности высокочастотного разряда. Были проведены исследования комбинированного плазмотрона для технологии получения нанопорошка диоксида титана.



Рис. 6

Для моделирования процессов в комбинированном плазмотроне и в реакторе разработана двумерная осесимметричная модель. Расчетная область разделена сеткой на 300000 ячеек.

Для того чтобы выбрать режим работы плазмотрона, при котором обеспечивается испарение исходного порошка TiO<sub>2</sub>, была проведена серия расчетов. При этом мощность дугового разряда менялась в диапазоне 10–15 кВт, мощность высокочас-

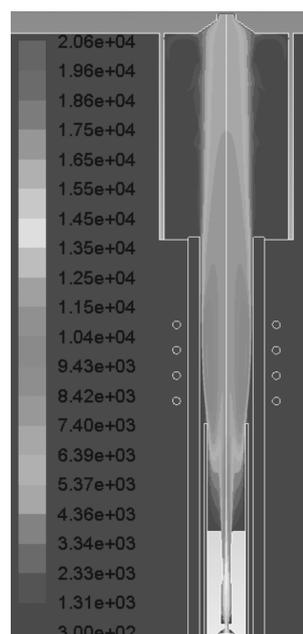


Рис. 7

тотного разряда — в диапазоне 20–40 кВт, расход газа — в диапазоне 20–100 л/мин, частота тока индуктора задавалась 1,76 и 5,28 МГц. Расчеты показали, что применение частоты 5,28 МГц для такой конструкции более эффективно.

Пример результатов расчета (распределение температуры, К) показан на рис. 7 (мощность дугового разряда 12 кВт, мощность высокочастотного разряда 20 кВт, расход газа 60 л/мин).

**Плазменная струя, загруженная мелкодисперсным порошком.** Также проводились исследования процесса обработки мелкодисперсного порошка диоксида титана ( $TiO_2$ ) в плазменной струе комбинированного плазмотрона. В данном процессе осевая симметрия плазменной струи нарушается за счет боковой подачи потока газа, транспортирующего мелкодисперсный порошок, поэтому осесимметричная модель не применима. Была разработана трехмерная модель процесса [8, 22, 23].

С целью определения рациональных условий обработки порошка были выполнены серии расчетов:

*1 серия. Варьирование расхода порошка (2, 3, 4 и 5 кг/ч) при одной и той же скорости его подачи (10 м/с).* Расчеты показали, что при увеличении расхода порошка уменьшается температура, до которой нагреваются частицы. Причина — в воздействии порошка на плазму. Плазма, передавая энергию и импульс частицам, т.е. нагревая их и ускоряя, при этом сама теряет энергию и импульс, т.е. охлаждается и замедляется. Причем чем больше расход порошка, тем больше частиц находится в плазменной струе, тем больше их воздействие на плазму, которое приводит к ухудшению теплопередачи от плазмы к частицам порошка.

Наилучший вариант оказался при расходе порошка 4 кг/ч, так как при этом наблюдалась наиболее оптимальная траектория движения частиц — через приосевую область плазменной струи, температура которой наиболее высока.

*2 серия. Варьирование скорости подачи порошка (5, 8, 10, 12 и 15 м/с) при одном и том же его расходе (4 кг/ч).* Анализ результатов показал, что при малых скоростях подачи мелкодисперсный порошок не попадает в центральную область плазменной струи, он движется в периферийной холодной области струи, не прогреваясь; при слишком большой скорости подачи порошок пролетает плазменную струю насквозь, нагреваясь незначительно, а затем быстро охлаждаясь вблизи стенки реактора. Оптимальная скорость подачи составила 8 м/с.

Результаты расчета плазменной струи без подачи порошка — распределение температуры (К) показана на рис. 8.

Результаты расчета при расходе порошка 4 кг/ч и скорости подачи 8 м/с показаны на рис. 9 и 10.

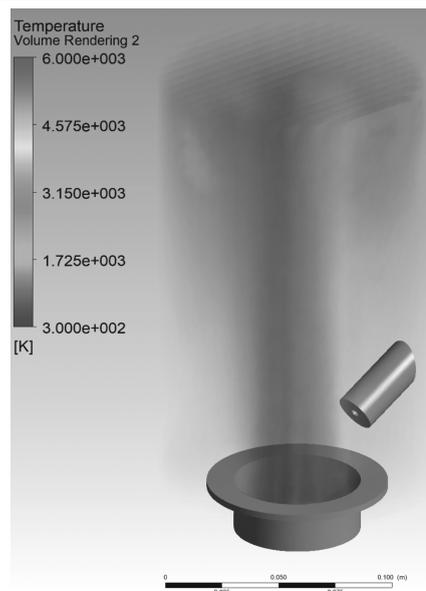


Рис. 8

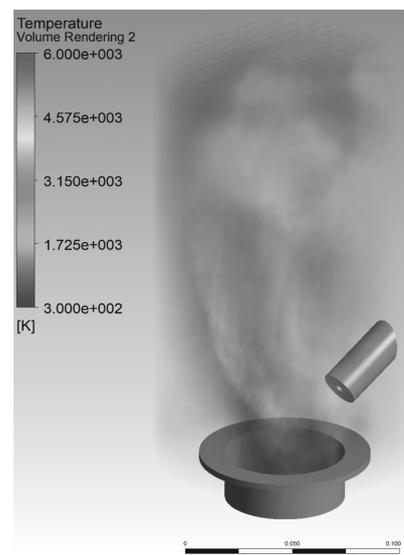


Рис. 9

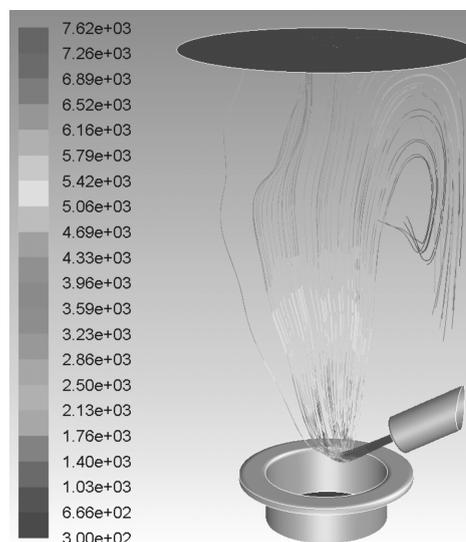


Рис. 10

На рис. 9 приведены значения температуры плазмы (К), а на рис. 10 — траектория движения и значения температуры частиц диоксида кремния (плавление и испарение не учитывались). Видно, что подача порошка приводит к существенному нарушению осевой симметрии плазменной струи.

**Аргоно-дуговая сварка и плазменная сварка.** Проводились сравнительные исследования процессов при аргоно-дуговой и плазменной сварке, включая процессы расплавления и движения расплава в сварочной ванне [24–27].

В модели рассматривались следующие основные силы, влияющие на движение металла в сварочной ванне:

сила Архимеда, возникающая в связи с разницей плотностей из-за нагрева электрической дугой;

сила, возникающая под действием давления электрической дуги;

электромагнитная сила, возникающая вследствие протекания электрического тока через ванну в присутствии магнитного поля;

эффект Марангони, представляющий собой перенос вещества вдоль границы раздела двух жидкостей вследствие наличия поверхностного натяжения [28].

На рис. 11 [27] показаны результаты моделирования — распределения температуры (К) для аргоно-дуговой (а) и плазменной (б) сварки. Диаметр сопла горелки для аргоно-дуговой сварки 12 мм, диаметр сопла плазменной горелки 6 мм. Расход аргона при аргоно-дуговой сварке составлял

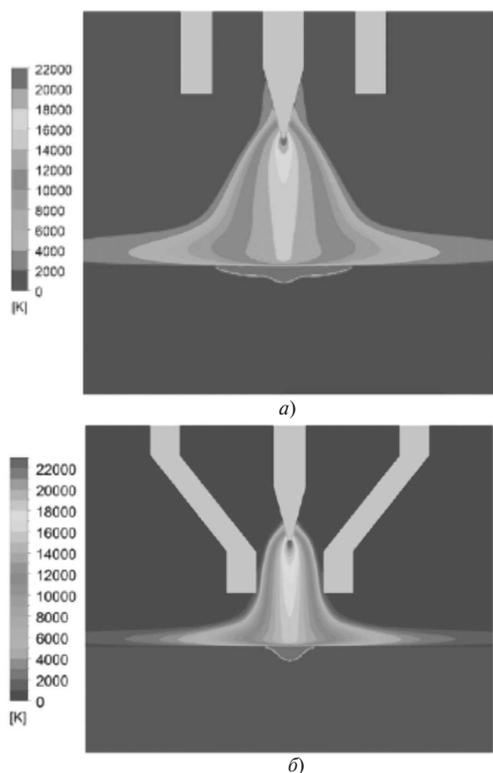


Рис. 11

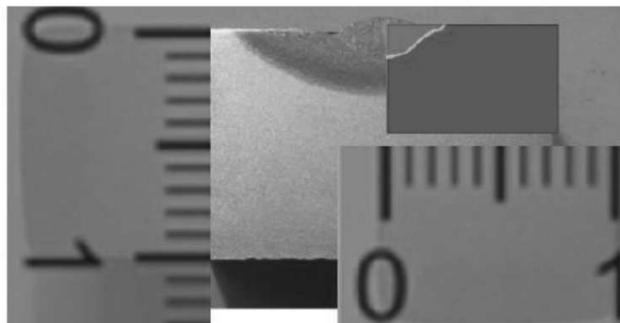


Рис. 12

12 л/мин, при плазменной сварке — 4 л/мин. Остальные параметры одинаковы в обоих случаях: ток дуги 200 А, скорость сварки 25 м/ч, расстояние от катода до пластины 10 мм, диаметр катода 3 мм, анод — углеродистая низколегированная сталь марки S235 толщиной 10 мм.

Полученные в результате расчетов профили сварочной ванны оказались близки к экспериментальным данным — см. рис. 12 [27], где показано сравнение профиля ванны расплавленного металла, полученного в результате макрошлифования технологического объекта из стали марки S235, с результатом моделирования (правая половина ванны).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов В.Я. Электротехнологические промышленные установки. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009, 571 с.
2. Иванов В.Н., Никитин Б.М., Брыков С.И., Эйленкриг Г.С., Русанов В.Д., Животов В.К., Дресвин С.В., Иванов Д.В. Высокоэффективные плазменные технологии для нефтяной и газовой промышленности. — Экспозиция Нефть Газ, 2010, № 1, с. 13–17.
3. Fretton P., Gonzalez J.J., Ranarijaona Z., Mougnot J. Energy equation formulations for two-temperature modelling of 'thermal' plasmas. — J. Phys. D: Appl. Phys., 2012, vol. 45, p. 465206 (22 pp).
4. Baeva M. Non-equilibrium Modeling of Tungsten-Inert Gas Arcs. — Plasma Chem. Plasma Process., 2017, vol. 37, pp. 341–370.
5. El-Hage M., Mostaghimi J., Boulos M. A Turbulent Flow Model for the RF Inductively Coupled Plasma. — J. Appl. Phys., 1989, vol. 65, No. 11, pp. 4178–4185.
6. Chen K., Boulos M. Turbulence in Induction Plasma Modeling. — J. Phys. D: Appl. Phys., 1994, vol. 27, pp. 946–952.
7. Frolov V., Murashov I., Ivanov D. Special Aspects of DC Air Plasma Torch's Operating Modes under Turbulent Flow Conditions. — Plasma Physics and Technology, 2015, vol. 2, No. 2, pp. 129–133.
8. Фролов В.Я., Иванов Д.В., Шибяев М.А. Моделирование плазменного процесса получения нанопорошковых материалов с помощью комбинированного плазмотрона. — Письма в Журнал технической физики, 2014, т. 40, № 16, с. 1–7.
9. Энгельшт В.С., Гурович В.Ц., Десятков Г.А. и др. Теория столба электрической дуги. Т. 1. Низкотемпературная плазма. — Новосибирск: Наука. 1990, 376 с.
10. Boulos M.I., Fauchais P., Pfender E. Thermal Plasmas: Fundamentals and Applications, vol. 1. — New York: Plenum Press, 1994, 452 p.
11. Фролов В.Я., Иванов Д.В., Мурашов Ю.В., Сиваев А.Д. Расчет состава плазмы дугового импульсного разряда в мультикамерном разряднике. — Письма в Журнал технической физики, 2015, т. 41, №. 7, с. 8–15.

12. Суперкомпьютерный центр «Политехнический» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://scc.spbstu.ru/index.php/resources/software>, свободный.

13. Фролов В.Я., Петров Г.К., Юшин Б.А., Иванов Д.В. Достижения в области воздушно-плазменной технологии нанесения покрытий. – Индукционный нагрев, 2013, №. 1 (23), с. 29–35.

14. Фролов В.Я., Юшин Б.А., Чуркин И.С. Плазменная технология нанесения декоративных покрытий. – Металлообработка, 2009, № 1, с. 20–23.

15. Фролов В.Я., Дубов М.В., Юшин Б.А. Анализ теплового состояния струйных плазмотронов. – Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2009, № 78, с. 125–129.

16. Baeva M., Zalach J., Uhrlandt D., Petrov G., Ushin B., Ivanov D., Frolov V. Study of plasma torches used for air plasma spraying of protective and decorative coatings. – 19th Symposium on Physics of Switching Arc 2011, FSO 2011, 2011, pp. 105–108.

17. Murashov I., Frolov V., Ivanov D. Numerical simulation of DC air plasma torch modes and plasma jet instability for spraying technology. – Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers In Electrical And Electronic Engineering Conference, ELCONRUSNW 2016, 2016, pp. 625–628.

18. Benmansour M. Développement, contrôle et modélisation d'un procédé de projection de poudres de silicium par plasma RF – application aux couches minces photovoltaïques. – Université Pierre et Marie Curie, 2003, 263 p.

19. Фролов В.Я., Лопота А.В., Петров Г.К., Иванов Д.В. Разработка дугового плазмотрона постоянного тока для инициирования индуктивно связанной плазмы. – Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2010, № 110, с. 319–324.

20. Фролов В.Я., Лопота А.В., Иванов Д.В. Высокочастотный индукционный плазмотрон для получения наноматериалов. – Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2011, № 117, с. 146–151.

21. Frolov V., Ivanov D., Zverev S., Ushin B., Petrov G., Matveev I. Experimental investigations of the hybrid plasma torch with reverse vortex stabilization. – Romanian Journal in Physics, 2011, vol. 56, No. SUPPL, pp. 36–40.

22. Frolov V., Ivanov D., Shibaev M. Plasma installation for TiO<sub>2</sub> fine powder production: mathematical simulation. – Plasma Physics and Technology, 2016, vol. 3, No. 2, pp. 57–61.

23. Фролов В.Я., Кархин В.А., Зверев С.Г., Иванов Д.В. Моделирование процесса испарения мелко дисперсного порошка в плазменной струе для получения наноматериалов. – Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2010, № 110, с. 308–319.

24. Toropchin A., Frolov V., Uhrlandt D. Calculation of the weld pool profile coupled with the arc simulation in a TIG process using software ANSYS CFX. – 20th Symposium on Physics of Switching Arc 2013, FSO 2013, 2013, pp. 301–304.

25. Фролов В.Я., Торопчин А.И. Влияние параметров плазмы дуги на форму сварочной ванны. – Письма в Журнал технической физики, 2015, т. 41, № 13, с. 41–47.

26. Toropchin A., Frolov V., Pipa A.V., Kazakov R., Uhrlandt D. Influence of the arc plasma parameters on the weld pool profile in TIG welding. – Journal of Physics: Conference Series, 2014, т. 550, p. 012004.

27. Торопчин А.И. Разработка модели и исследование процесса взаимодействия сжатой электрической дуги с технологическим объектом: Дис. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2015, 118 с.

28. Tanaka M., Lowke J.J. Predictions of weld pool profiles using plasma physics. – J. Phys. D: Appl. Phys., 2007, vol. 40, pp. R1–R23.

[18.04.2018]

*А в т о р ы: Фролов Владимир Яковлевич окончил Ленинградский политехнический институт (ЛПИ) в 1974 г. В 2004 г. защитил докторскую диссертацию «Теория процессов и определение параметров эффективной электроконтактно-дуговой технологии обработки металлов». Заведующий кафедрой «Электротехника и электроэнергетика» в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого.*

*Иванов Владимир Николаевич окончил Ленинградский электротехнический институт (ЛЭТИ) в 1959 г. В 1984 г. защитил докторскую диссертацию «Непрерывная высокочастотная сварка металлов. Исследования, разработка и внедрение технологических процессов и оборудования». С 1959 по 2015 гг. работал во Всероссийском научно-исследовательском институте токов высокой частоты им. В.П. Володина.*

*Иванов Дмитрий Владимирович окончил Санкт-Петербургский государственный технический университет в 1999 г. В 2003 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование высокочастотного индукционного плазмотрона с тремя независимыми потоками газа». Доцент кафедры «Электротехника и электроэнергетика» в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого.*

*Elektrichestvo, 2018, No. 7, pp. 54–60*

*DOI:10.24160/0013-5380-2018-7-54-60*

## The Mathematical Models of Plasma Electrical Technology Processes

**FROLOV Vladimir Y.** (*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*) – *Head of the Department, Dr. Sci. (Eng.)*

**IVANOV Vladimir N.** (*All-Russian Research Institute of high-frequency currents of V.P. Vologdin, St. Petersburg, Russia*) – *Dr. Sci. (Eng.)*

**IVANOV Dmitriy V.** (*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*) – *Associate Professor, PhD*

*Specialists of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University's Chair for Electrical Engineering and Electric Power Engineering conduct developments of various plasma electrical technology*

processes with the aid of mathematical modeling methods. The article presents the basic mathematical model for calculating plasma electrical technology processes and gives the results of calculations, carried out using the developed models, for an air-arc plasmatron intended for applying coatings, for a high-frequency induction plasmatron for purifying silicon, and for a combined plasmatron for obtaining nanomaterials, for producing a plasma jet charged with finely dispersed powder, and for carrying argon-arc and plasma arc welding. The results obtained from mathematical modeling are corroborated by experimental investigations, which allows a conclusion to be drawn about the adequacy of the developed models.

**Key words:** electrical technologies, plasma processes, plasmatrons, mathematical modeling, temperature distribution

## REFERENCES

1. **Frolov V.Ya.** *Elektrotehnologicheskiye promyshlennyye ustanovki* (Electrotechnological industrial installations). St.Petersburg, Poytechnical University, 2009, 571 p.
2. **Ivanov V.N., Nikitin B.M., Brykov S.I., Eilenkrig G.S., Rusanov V.D., Zhiivotov V.K., Dresvin S.V., Ivanov D.V.** *Ekspozitsiya Neft' Gaz – in Russ. (Exposition Oil Gas)*, 2010, No. 1, pp. 13–17.
3. **Fretton P., Gonzalez J.J., Ranarijaona Z., Mougenot J. J.** *Phys. D: Appl. Phys.*, 2012, vol. 45, p. 465206 (22 pp).
4. **Baeva M.** *Plasma Chem. Plasma Process.*, 2017, vol. 37, pp. 341–370.
5. **El-Hage M., Mostaghimi J., Boulos M.** *A J. Appl. Phys.*, 1989, vol. 65, № 11, pp. 4178–4185.
6. **Chen K., Boulos M. J.** *Phys. D: Appl. Phys.*, 1994, vol. 27, pp. 946–952.
7. **Frolov V., Murashov I., Ivanov D.** *Plasma Physics and Technology*, 2015, vol. 2, No. 2, pp. 129–133.
8. **Frolov V.Ya., Ivanov D.V., Shibaev M.A.** *Pis'ma v Zhurnal tehnikeskoj fiziki – in Russ. (Letters to the Technical Physics)*, 2014, t. 40, No. 16, pp. 1–7.
9. **Engel'sht V.S., Gurovich V.Ts., Desyatkov G.A. et al.** *Teoriya stolba elektricheskoi dugi. T. 1. Nizkotemperaturnaya plazma* (Theory of electric arc column. Vol 1. Low-temperature plasma). Novosibirsk, Publ. «Nauka», 1990, 376 p.
10. **Boulos M.L., Fauchais P., Pfender E.** *Thermal Plasmas: Fundamentals and Applications*, vol. 1. – New York: Plenum Press, 1994, 452 p.
11. **Frolov V.Ya., Ivanov D.V., Murashov Yu.V., Sivayev A.D.** *Pis'ma v Zhurnal tehnikeskoj fiziki – in Russ. (Letters to the Technical Physics Journal)*, 2015, vol. 41, No. 7, pp. 8–15.
12. **Superkomputerniy tsentr «Politekhnikeskii»** [Electronic resource]: <http://scc.spbstu.ru/index.php/resources/software>
13. **Frolov V.Ya., Petrov G.K., Yushin B.A., Ivanov D.V.** *Induktsionnyi nagrev – in Russ. (Induction heating)*, 2013, No. 1 (23), pp. 29–35.
14. **Frolov V.Ya., Ushin B.A., Churkin I.S.** *Metalloobrabotka – in Russ. (Metal treatment)*, 2009, No. 1, pp. 20–23.
15. **Frolov V.Ya., Dubov M.V., Ushin B.A.** *Nauchno-tekhnikeskiye vedomosti SPbPU – in Russ. (Science-technical Statements of St. Petersburg State Polytechnical University)*, 2009, No. 78, pp. 125–129.
16. **Baeva M., Zalach J., Uhrlandt D., Petrov G., Ushin B., Ivanov D., Frolov V.** *Proc. of the 19th Symposium on Physics of Switching Arc 2011, FSO 2011, 2011*, pp. 105–108.
17. **Murashov I., Frolov V., Ivanov D.** *Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers In Electrical And Electronic Engineering Conference, ELCONRUSNW 2016, 2016*, pp. 625–628.
18. **Benmansour M.** *Développement, contrôle et modélisation d'un procédé de projection de poudres de silicium par plasma RF – application aux couches minces photovoltaïques. – Université Pierre et Marie Curie, 2003*, 263 p.
19. **Frolov V.Ya., Lopota A.V., Petrov G.K., Ivanov D.V.** *Nauchno-tekhnikeskiye vedomosti SPbPU – in Russ. (Science-technical Statements of St. Petersburg State Polytechnical University)*, 2010, No. 110, pp. 319–324.
20. **Frolov V.Ya., Lopota A.V., Ivanov D.V.** *Nauchno-tekhnikeskiye vedomosti SPbPU – in Russ. (Science-technical Statements of St. Petersburg State Polytechnical University)*, 2011, No. 117, pp. 146–151.
21. **Frolov V., Ivanov D., Zverev S., Ushin B., Petrov G., Matveev I.** *Romanian Journal in Physics*, 2011, vol. 56, № SUPPL, pp. 36–40.
22. **Frolov V., Ivanov D., Shibaev M.** *Plasma Physics and Technology*, 2016, t. 3, No. 2, pp. 57–61.
23. **Frolov V.Ya., Karkhin V.A., Zverev S.G., Ivanov D.V.** *Nauchno-tekhnikeskiye vedomosti SPbPU – in Russ. (Science-technical Statements of St. Petersburg of St. Petersburg State Polytechnical University)*, 2010, No. 110, pp. 308–319.
24. **Toropchin A., Frolov V., Uhrlandt D.** *Proc. of the 20th Symposium on Physics of Switching Arc 2013, FSO 2013, 2013*, pp. 301–304.
25. **Frolov V.Ya., Toropchin A.I.** *Pis'ma v Zhurnal tehnikeskoj fiziki – in Russ. (Letters to the Technical Physics Journal)*, 2015, t. 41, No. 13, pp. 41–47.
26. **Toropchin A., Frolov V., Pipa A.V., Kazakov R., Uhrlandt D.** *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 550, p. 012004.
27. **Toropchin A.I.** *Razrabotka modeli i issledovaniye protsessy vzaimodeystviya szhatoi elektricheskoi dugi s tekhnologicheskim ob'yektom: Diss..kand. tekhn. nauk* (Development of a model and study of the process of a compressed electric arc with a technological object: Authors abstract of Cand. Sci. (Eng.)). Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2015, 118 p.
28. **Tanaka M., Lowke J.J.** *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2007, vol. 40, pp. R1–R23.

[18.04.2018]