

УДК 519.63:533.9.07

Д. А. БРЕГА, М. В. ЛЕСОВОЙ, Е. А. ЛЕБЕДЯНСКАЯ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННОГО ПЛАЗМОГЕНЕРАТОРА НА ПРОФИЛЬ СКОРОСТЕЙ В РАЗРЯДНОМ КАНАЛЕ

*Проведено исследование внутренней газодинамики высокочастотного индукционного (ВЧИ) плазмогенератора для выявления факторов, определяющих характер течения газа и траектории распыляемой твердой фракции для задач нанесения покрытий и сфероидизации порошков. Для повышения эффективности процесса нанесения покрытий высокочастотным плазмогенератором выполнен сравнительный анализ профилей скоростей и температур внутри газоразрядного канала плазмотрона в зависимости от положения индуктора. Предложено математическое описание индукционной плазмы в рамках магнитогазодинамического подхода. В качестве объекта исследования выбран ВЧИ плазмотрон типа ТЕКНА 50.*

**Ключевые слова:** плазма, ВЧИ плазмотрон, излучение, поле скоростей, сфероидизация.

### Введение

Высококонцентрированные источники энергии находят все более широкое применение в современных технологиях производства. Высокие скорости нагрева и охлаждения позволяют получать уникальные структуры и свойства материалов, резко отличающиеся от их строения и свойств в исходном состоянии, модифицировать поверхность, формировать особые защитные и упрочняющие поверхностные слои, производить резку, наплавку, сварку. К высококонцентрированным источникам энергии можно отнести плазменные потоки, лазерные, ионные и электронные пучки.

Требования к ресурсу деталей и узлов в современном производстве, диктует необходимость все более широкого применения функциональных покрытий.

Для задач ремонта, восстановления деталей наибольшее распространение получили методы плазменно-дугового и плазменно-индукционного напыления функциональных покрытий. В отличие от электродуговых методов нанесения покрытий, где остро стоит вопрос чистоты плазмы, а также ресурса катодного и анодного узла, ВЧИ-плазматрон благодаря безэлектродной, кольцевой форме индукционных токов является одним из немногих источников, позволяющих генерировать чистую плазму, не загрязненную материалами электродов. К преимуществам ВЧИ-плазматрона можно также отнести практически неограниченный ресурс

работы в любой газовой среде [1]. Перечисленные выше особенности ВЧ разряда предопределили его использование для синтеза, сфероидизации порошков [2-4] и нанесения различного рода покрытий.

Следует отметить, что вопросам исследования электродуговой и индукционной плазмы посвящено большое количество работ [5, 6], однако влиянию геометрических параметров плазмогенераторов на пульсации в разрядном канале, равномерность профиля скоростей уделено недостаточное внимание. Несимметричность профиля температуры, действие силы Лоренца на поток газа приводит к возмущениям и, как следствие, искажению профиля распыляемого порошка рис. 1, что непосредственно сказывается на равномерности и качестве покрытия.

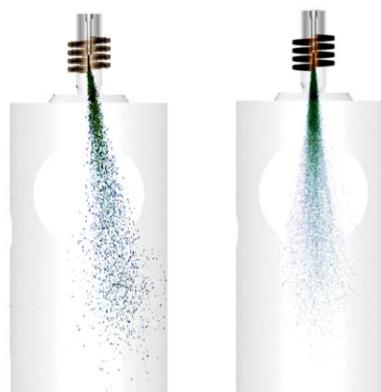


Рис. 1. Изменение траекторий дискретной фракции со временем [7]

Целью данной работы является определение степени влияния положения индуктора на профиль скоростей внутри газоразрядного канала индукционного плазменогенератора.

**Постановка задачи исследования**

В рамках данной статьи рассмотрен ВЧИ плазмотрон типа ТЕКНА 50 с аксиальной газовой стабилизацией плазмы в разрядном канале. Задача решалась в двумерной осесимметричной нестационарной постановке. Для решения использовался программный комплекс Comsol-Multiphysics. На рис. 2 представлена геометрия расчетной области и расчетная сетка модели. Граничные условия для моделирования сведены в таблицу 1.

Модель была записана с учетом следующих предположений:

1. Плазма предполагается квазинейтральной:  $n_e = n_i$  или  $n_e = \sum_a Z_a n_a$  в случае многозарядных ионов или многокомпонентной плазмы.
2. Термически равновесной – температура всех групп частиц одинакова.
3. В плазме справедлив закон Ома в простейшей форме  $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ .

Модель базируется на классической системе уравнений Навье-Стокса, дополненной системой уравнений Максвелла:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = 0, \tag{1}$$

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p - \nabla \cdot \vec{\tau} + \vec{j} \times \vec{B}, \tag{2}$$

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \vec{j} \cdot (\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) - 4\pi \epsilon_r + \frac{5k_B}{e} \vec{j} \cdot \nabla T + \frac{Dp}{Dt}, \tag{3}$$

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = 0, \tag{4}$$

$$\nabla^2 A - i\omega \mu_0 \sigma A + \mu_0 j_{coil} = 0, \tag{5}$$

где t – время;  
u – скорость газа;

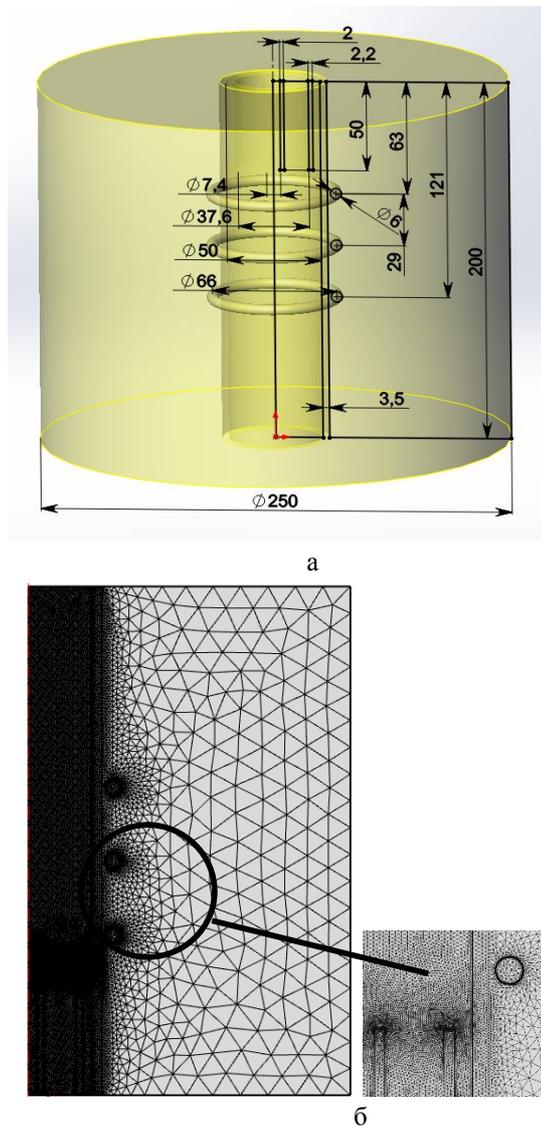


Рис. 2. Расчетная область:  
а – геометрические размеры области;  
б – конечно элементная модель области

Таблица 1

Граничные условия моделирования

№	Положение первого витка индуктора, мм	Массовый расход аргона – Q <sub>1</sub> , л/мин	Массовый расход аргона – Q <sub>2</sub> , л/мин	Массовый расход аргона – Q <sub>3</sub> , л/мин	Мощность, P, кВт	Частота, f, МГц
1	53	1	3	31	11	3
2	63	1	3	31	11	3
3	73	1	3	31	11	3
4	83	1	3	31	11	3

- $\rho$  – плотность газа;  
 $P$  – давление газа;  
 $\tau$  – тензор вязких сдвиговых напряжений;  
 $j_{\text{coil}}$  – плотность электрического тока в катушке;  
 $\sigma$  – электропроводность плазмы;  
 $\mu_0$  – магнитная проницаемость среды;  
 $\omega (\omega=2\pi f)$  – представляет собой угловую частоту;  
 $f$  – частота электромагнитного поля.

Как известно система усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (1)-(5) замыкается уравнениями турбулентности. Однако разнообразие существующих подходов к описанию течений требует более детального рассмотрения основных из них и обоснованного выбора модели турбулентности, соответствующей требованиям, предъявляемым в зависимости от особенностей объекта исследований.

При исследовании течений плазмообразующего газа в индукционных устройствах имеют место следующие основные особенности моделируемой системы:

- наличие дополнительных уравнений для описания электрических характеристик дуги;
- существенная нелинейность уравнений, прежде всего в силу зависимостей коэффициентов переноса от температуры;
- неоднородность характера течения.

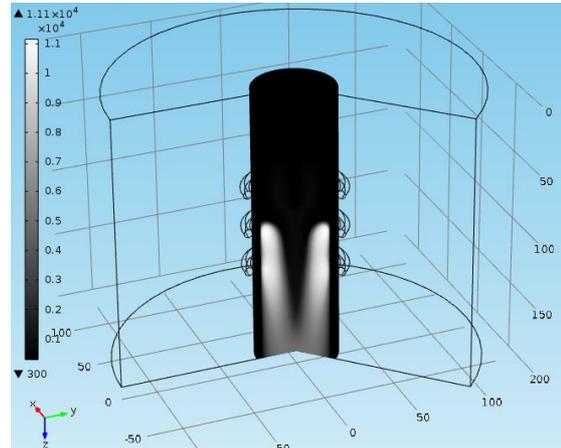
Следовательно, основными критериями для выбора модели турбулентности должны быть: возможность корректного отображения картины течения с отрывом потока и образованием дискретных вихрей; модель турбулентности должна быть не требовательной к вычислительным ресурсам, а решение должно слабо зависеть от качества конечноэлементной сетки. Исходя из рекомендаций [8], в данном случае была выбрана однопараметрическая модель турбулентности Спаларта-Альмараса, содержащая одно уравнение переноса:

$$\frac{D\tilde{\nu}}{Dt} = P^{\nu} - D^{\nu} + \frac{\nabla \cdot [(\nu + \tilde{\nu}) \nabla \tilde{\nu}]}{\sigma} + \frac{c_{b2} [(\nabla \tilde{\nu}) \cdot (\nabla \tilde{\nu})]}{\sigma} + f_{t1} \nabla U^2.$$

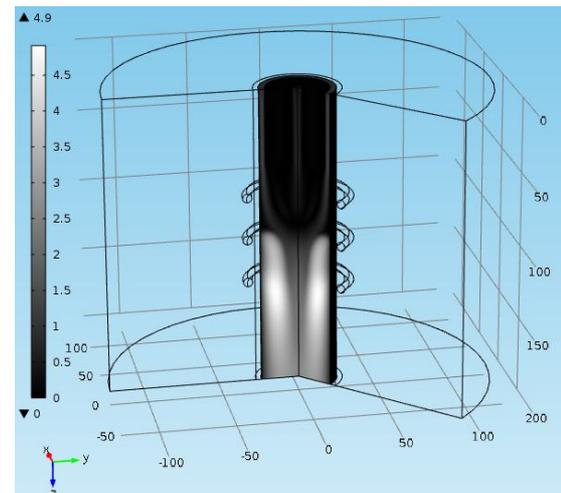
Она не требовательна к вычислительным ресурсам и дает качественное и количественное совпадение с экспериментальными данными для задач внутреннего обтекания.

## Результаты моделирования

Контроль сходимости решения определялся исходя из значений по невязкам для системы дифференциальных уравнений для каждого шага по времени. Максимальное значение невязок было задано –  $10^{-4}$ . На рис. 3 представлено поле температур и скоростей.



а



б

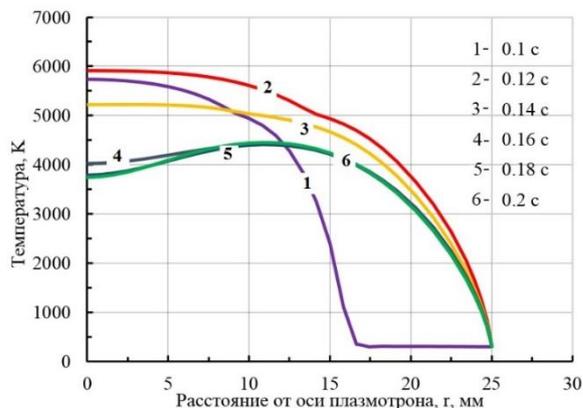
Рис. 3. Результаты моделирования для исходного положения индуктора (расстояние до первого витка – 63 мм):

- а – распределение поля температур, К;
- б – распределение поля скоростей, м/с

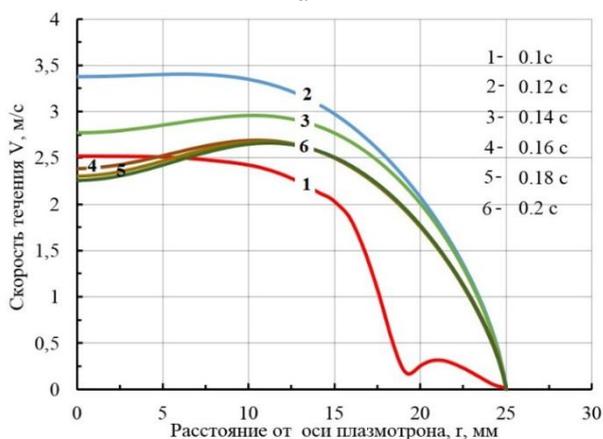
Характер изменения значений температуры и скорости газа на выходе из плазмогенератора в зависимости от времени представлен на рис. 4.

Как видно из рис. 5 для варианта со смещением индуктора на 10 мм. профиль скоростей наиболее приближен к параболическому закону, в остальных

случаях профиль имеет явно выраженный пик, несовпадающий с осью канала плазмогенератора, что может свидетельствовать о присутствии вторичных обратных токов.



а



б

Рис. 4. Результаты расчета поля скоростей и температур в газоразрядном канале: а – зависимость температуры на срезе сопла от времени; б – зависимость скорости на срезе сопла от времени

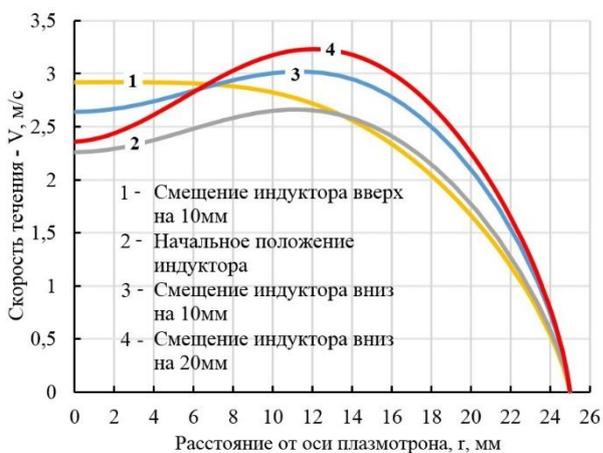


Рис. 5. Зависимость скорости потока от положения индуктора

## Выводы

На основании полученного результата можно сделать вывод о том, что положение индуктора существенно влияет на профиль скоростей на срезе генератора плазмы, использование осесимметричной модели не позволяет в полной мере исследовать характер течения. Применение модели равновесной плазмы также не совсем корректно, для более детального исследования в дальнейшей работе предполагается рассмотреть задачу в трехмерной постановке с более подробным описанием плазмы в терминах функции распределения электронов по координатам и импульсам, используя кинетический подход.

## Литература

1. Дресвин, С. В. Плазмтроны: конструкции, параметры, технологии [Текст] : учебное пособие / С. В. Дресвин, С. Г. Зверев. – СПб. : Изд-во политехн. ун-та, 2007. – 177 с.
2. Lee, H. Modelling of an inductively coupled plasma torch with argon at atmospheric pressure [Text] / H. Lee, Y. Kim and C. Chung // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2011. – № 39. – P. 25-36.
3. Modelling of an inductively coupled plasma torch with argon at atmospheric pressure [Text] / M. Abrar, A. Qayyum, A. R. Gilani, A. W. Khan, A. Saeed, S. Naseer and M. Zakauallah // Curr. Appl. Phys. – 2013. – № 13. – P. 69.
4. Spectroscopic diagnostic of an argon–hydrogen RF inductive thermal plasma torch at atmospheric pressure used for silicon hydrogenation [Text] / F. Bourg, S. Pellerin, D. Morvan, J. Amouroux and J. Chapelle // J. Phys. D : Appl. Phys. – 2002. – № 35. – P. 81-90.
5. Нгуен, Куок Ши. Исследование индукционных и дуговых плазмтронов [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.10 / Нгуен Куок Ши. – Санкт-Петербург, 2002. – 439 с.
6. Саломатов, В. В. Математическое моделирование процессов в электродуговых генераторах низкотемпературной плазмы [Текст] : дис. ... канд. физ. мат. наук : 05.13.18 / Саломатов Василий Владимирович. – Новосибирск, 2003. – 116 с.
7. Colombo, V. 3-D simulations of particle heating in ICP torches with reaction chamber: effect of flow rate, composition, power and frequency [Text] / V. Colombo, E. Ghedini // J. Phys. D : Appl. Phys. – 2010. – № 43. – P. 148-156.
8. Spalart, P. R. Strategies for turbulence modeling and simulation [Text] / P. R. Spalart // Int. J. Heat Fluid Flow. – 2000. – № 21. – P. 252-263.

*Поступила в редакцию 1.10.2015, рассмотрена на редколлегии 18.11.2015*

## **ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІНДУКЦІЙНОГО ПЛАЗМОГЕНЕРАТОРА НА ПРОФІЛЬ ШВИДКОСТЕЙ В РОЗРЯДНОМУ КАНАЛІ**

*Д. А. Брега, М. В. Лесовой, О. О. Лебедянська*

Проведено дослідження внутрішньої газодинаміки високочастотного індукційного (ВЧІ) плазмогенератора для виявлення факторів, що визначають характер перебігу газу і траєкторії твердої фракції для задач нанесення покриттів і сфероїдизації порошків. Для підвищення ефективності процесу нанесення покриттів високочастотним плазмогенератором виконано порівняльний аналіз профілю швидкостей і температур всередині газорозрядного каналу плазмотрона в залежності від положення індуктора. Запропоновано математичний опис індукційної плазми в рамках магнітогазодинамічного підходу. В якості об'єкта дослідження обрано ВЧІ плазмотрон типу ТЕКНА 50.

**Ключові слова:** плазма, ВЧІ плазмотрон, випромінювання, поле швидкостей, сфероїдизація.

## **INFLUENCE OF AN ICP GENERATOR GEOMETRICAL PARAMETERS ON THE VELOCITY PROFILE IN THE DISCHARGE CHANNEL**

*D. A. Brega, M. V. Lisovyi, H. A. Lebedjanskaja*

To identify the factors which determines the nature of the gas flow and the trajectory of discrete phase for coatings deposition and spheroidization tasks the peculiarities of the internal gas dynamics at high frequency induction (HFI) plasma generator were investigated. To increase the efficiency of deposition of coatings with high-frequency plasma generator a comparative analysis of velocity and temperature profiles in gas-discharge plasma torch channel depending on the position of the inductor are made. A mathematical description of induction plasma within magnetogasdynamics approach is suggested in the article. HFI plasma torch type TEKNA 50 selected as the object of study.

**Keywords:** plasma, HFI plasma torch, emission, velocity field, spheroidization.

**Брега Дмитрий Андреевич** – канд. техн. наук, доцент каф. технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: brega10.04@gmail.com.

**Лесовой Максим Васильевич** – магистрант каф. технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Лебедянская Елена Алексеевна** – студент каф. технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.