

УДК 621.438
С 32

ANALYSIS OF INFLUENCE OF MODE AND GEOMETRIC CHARACTERISTICS ON PROCESSES OF HIGH-FREQUENCY INDUCTIVE PLASMA TORCH WITH REVERSE VORTEX FLOW

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
НА ПАРАМЕТРЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО
ПЛАЗМОТРОНА С «ОБРАТНЫМ» ВИХРЕМ**

DOI 10.15589/SMI20140206

**Sergey I.
Serbin**
Сербин
Сергей
Иванович

Sergey I. Serbin

С. И. Сербин, д-р техн. наук, проф.
serhiy.serbin@nuos.edu.ua
ORC ID: 0000-0002-3423-2681

Anna B. Mostipanenko

А. Б. Мостипаненко, канд. техн. наук, доцент
anna.mostypanenko@nuos.edu.ua
ORC ID: 0000-0001-7510-7070



**Anna B.
Mostipanenko**
Мостипаненко
Анна
Борисовна

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, г. Николаєв

Abstract. The analysis of aerodynamic and heat structure of flow in high-frequency inductive plasma torch has been carried out. The range of plasma torch power is measured in dozens of kilowatts.

The numerical simulation methods of the turbulent flow in the plasma torch affected by high frequency electromagnetic field without considering the chemical kinetics are used during the research.

The data of temperature field and induced current density in the plasma torch depending on current amperage and frequency are obtained. Also, these data are obtained depending on the flow scheme in the operated on argon and air plasma torches.

The inductive plasma torches can be applied to solve a wide range of tasks such as activation of coal-dust mixture with its further gasification, coating process for the stabilization of combustion processes as well as for the recycling processes at the mobile seaport recycling complexes.

The calculations demonstrated convincingly the advantage of the operation of plasma torches with reverse vortex flow over plasma torches with “direct” vortex flow. Moreover the obtained data allow executing the assessment of thermal efficiency of inductive plasma jet and obtaining its optimal operational modes.

Keywords: plasma, combustion, numerical methods, plasma torch.

Аннотация. Проведен анализ аэродинамической и тепловой структуры потока в высокочастотном индукционном плазматроне. Численное моделирование позволило выявить влияние режимных характеристик на работу плазмотрона.

Ключевые слова: плазма, горение, численные методы, плазмотрон.

Анотація. Проведено аналіз аеродинамічної і теплової структури потоку у високо-частотному індукційному плазмотроні. Числове моделювання дозволило виявити вплив режимних характеристик на роботу плазмотрона.

Ключові слова: плазма, горіння, числові методи, плазмотрон.

References

Vasilevskiy S.A. Chislennoye modelirovaniye techeniy ravnovesnoy induktsionnoy plazmy v tsilindricheskom kanale plazmatrona [Numerical Simulation of Flows of Equilibrium Inductive Plasma in Cylindrical Channel of Plasma Torch]. *Izv. AN SSSR. Mekh. zhidk. gaza* [Proceedings of the Science Academy of USSR. Mechanics of liquid gas], 2000, no. 5, pp. 164–173.

Vlasov V.I. Teoreticheskoye issledovaniya techeniya vysokotemperaturnogo gaza v razryadnoy i rabochey kamerakh VCH [Theoretical Studies of High-Temperature Gas Flow in Discharge and Working Chambers of the RF Plasma Torch]. *Kosmonavtika i Raketostroyeniye* [Space and Rocketry], 2001, no. 23, pp. 18–26.

Gorshkov A. B. Chislennoye modelirovaniye obtekaniya modeley v struye vysokochastotnogo plazmatrona [Numerical Simulation of Patterns Flow Over in High-Frequency Plasma Torch Jet]. *Kosmonavtika i Raketostroeniye* [Space and Rocketry], 2004, no. 3(36), pp. 54–61.

Sakharov V. I. Chislennoye modelirovaniye techeniy v individualnom plazmatrone i teploobmena v nedorasshirennykh struyakh vozdukh dlya usloviy eksperimentov na ustanovke VGU-4 (IPMekh RAN) (Numerical Simulation of Flows in Inductive Plasma Torch and Heat Transfer in Underexpanded Air Jets for Experimental Conditions at the IPG-4 (IPMekh RAN) Facility). *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoy dinamike — Physical and chemical kinetics in gas dynamics*, 2007, issue 5, p. 23. Available at: www.chemphys.edu.ru/article/50 (accessed December 12, 2013).

Eneglsht V. S., Gurovich V. Ts., Desyatkov G. A. et al. *Teoriya stolba dugi (Nizkotemperaturnaya plazma. T. 1)* [Theory of Arc Column (Low-Temperature Plasma, Vol. 1)]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990. 376 p.

Advanced CFD & Multiphysics with complete solution & coupling capability. Available at: www.esi-group.com/products/multiphysics/ace-multiphysics-suite (accessed December 12, 2013).

Bernardi D., Colombo V., Coppa G. G. M., Ghedini E., Mentrelli A. Numerical Modelling of RF–RF Hybrid Plasma Torches and Parametric Study for Various Geometric, Flow and Electric Configurations. *24 The European Physical Journal. Progress in Plasma Processing of Materials, Proceedings of the 6-th International Thermal Plasma Processing Conference, Strasbourg* (France), (30.05–2.06.2001). New York-Wallingford, Begell House, 2001, pp. 339–346.

Choudhury D. Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling, Fluent Inc. Technical Memorandum TM-107, 1993.

Gordeev A. N., Kolesnikov A. F., Kononov S. V. Comparative Characterization of the IPG-4 Inductive Plasmatron in Subsonic and Supersonic Regimes of Air Plasma Flows, Int. Conf. on Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2004), Proceedings. Part I., Publishing House “Nonparel”, Novosibirsk, 2004. pp. 106–111.

Korolev Yu. D., Matveev I. B. Non-steady State Processes in a Plasma Pilot for Ignition and Flame Control, IEEE Trans. Plasma Sci., 2006, issue 34, no. 6, pp. 2507–2513.

Matveev I., Serbin S., Mostipanen G. Numerical Optimization of the Tornado Combustor Aerodynamic Parameters, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2007–391, Reno, Nevada, USA, 8–11 January, 2007, 12 p.

Utyuzhnikov S. V., Konyukhov A. V., Rudenko D. V., Vasilevskiy S. A., Kolesnikov A. F., Pershin I. S., Chazot O. Numerical simulation of sub- & supersonic flows into inductive plasmatoms, 16-th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Orlando, USA, 2003.

Matveev I. B., Matveeva S. A., Kirchuk E. Y., Serbin S. I., Bazarov V. G. Plasma Fuel Nozzle as a Prospective Way to Plasma-Assisted Combustion, IEEE Trans. Plasma Sci., 2010, issue 38, no. 12, pp. 3313–3318.

Serbin S. I. Features of liquid-fuel plasma-chemical gasification for diesel engines, IEEE Trans. Plasma Sci., 2006, issue 34, no. 6, pp. 2488–2496.

Serbin S. I. Modeling and Experimental Study of Operation Process in a Gas Turbine Combustor with a Plasma-Chemical Element, Combustion Science and Technology, 1998, issue 139, pp 137–158.

Serbin S. I., Matveev I. B., Mostipanen G. B. Investigations of the Working Process in a “Lean-Burn” Gas Turbine Combustor With Plasma Assistance, Trans. Plasma Sci., 2011, issue 39, no. 12, pp. 3331–3335.

Problem statement. The naval port facilities have been growing rapidly the last 10 years. To provide the fast growing needs of the economy and foreign trade cargo handling it is necessary to increase the production capacity of domestic seaports through the construction of new transshipment facilities and reconstruction of the existing ones. At the same time modern ports should be designed and constructed taking into account the achievements of the world best practice for the eco-saving systems and the maintenance of the appropriate environmental quality.

The particular importance is given to the reduction of the impact of production processes on the environment. To solve the full range of environmental issues which arise in the connection with the port development and the centralization of the process of development of its single environmental infrastructure it is planned to implement the mobile eco complexes for the collection, treatment and disposal of ship waste. It is also possible to destroy

Постановка проблемы. Морские портовые сооружения в последние 10 лет интенсивно наращивают мощности. Обеспечения быстро растущих потребностей экономики и международных торговых грузоперевозок необходимо увеличить производственные мощности внутренних морских портов за счет строительства новых и реконструкции существующих перевалочных мощностей. В то же время современные порты должны проектироваться и строиться с учетом лучших мировых достижений и только при условии сохранения экосистем и поддержания соответствующего качества окружающей среды.

Особое значение придается снижению воздействия производственных процессов на окружающую среду. Для решения всего комплекса экологических вопросов, которые возникают в связи с развитием порта, и централизации процесса создания его единой экологической инфраструктуры планируется применять мобильные экологические комплексы

the sludge there which will be dewatered and incinerated with solid waste taken from the ships.

Since the 1950s, the plasma-related processing has been a promising tool to enable and speed up combustion processes for numerous technologies in chemical and refining industry. So the plasma torches can be included as a part of power systems of the maritime infrastructure at the seashores, on the floating electric power plants and on the waste recycling complexes.

The major disadvantage of the existing high-power devices is their limited lifetime because of the electrode erosion or its melting. This problem was successfully solved by the International Plasma Technology Center (IPTC) which introduced its 50–150–300 kW hybrid plasma torches (Fig. 1) to the market with the main focus on waste and coal gasification, electronic grade silicon production, materials modification, nano-powder production, and related applications. These plasma torches are based on reverse vortex scheme, which prolong the lifetime of the plasma torch by means of effective cooling of the walls with the vortex. The other advantage of that scheme is a constructive simplicity. For the first time such highly swirled aerodynamic flow structures were used for the inductive plasma torches where laminar flows were used mostly.

Latest research and publications analysis. Plasma is a very complex phenomenon from the physical point of view. The electromagnetic, thermodynamic, hydrodynamic and chemical processes which are also non-stationary in time are present and interconnected. Thus, the main aim of the simulation of plasma phenomena in plasma devices has not been researched to the full extent today notwithstanding the quite big amount of works in this field [1–4, 7, 9, 10, 12–16].

The article aim — in this work with the help of mathematical model of high-frequency plasma torch, implemented in CFD-ACE+© software developed by ESI-Group [6], the analysis of aerodynamic and heat structure of the flow in the high-frequency inductive plasma torch channel is carried out. The numerical simulation allowed defining the impact of mode and geometrical characteristics on the plasma torch operation and formulating the recommendations on the high-frequency plasma generators design.

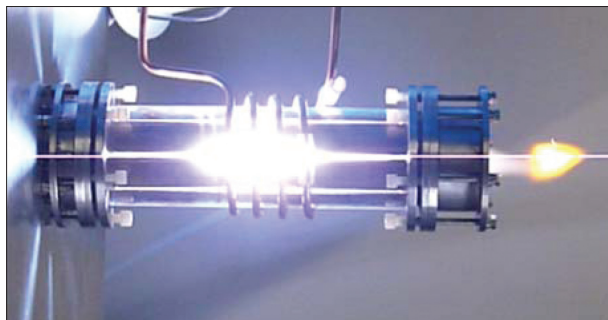


Fig. 1. Inductive Plasma Torch

Рис. 1. Индукционный плазматрон

для сбора, обработки и утилизации судовых отходов. Там же предполагается уничтожать осадок очистных сооружений, который будет обезвоживаться и сжигаться вместе с твердыми бытовыми отходами, принимаемыми с кораблей.

С 50-х годов XX века плазменная обработка считалась перспективным методом, позволяющим поддерживать и ускорять процессы сгорания для многочисленных технологий в химической и нефтеперерабатывающей промышленности. Так, плазмотроны могут быть включены как часть энергетического комплекса морской инфраструктуры на морском побережье, на плавучих электростанциях и комплексах по переработке отходов.

Основным недостатком существующих мощных плазмотронов является их ограниченный срок службы из-за эрозии электрода или его плавления. Эта проблема была успешно решена Международным центром плазменных технологий (IPTC), который представил на рынке свою линейку 50–150–300 кВт гибридных плазмотронов (рис. 1), основным назначением которых является газификация отходов и угля, создание и нанесение композитных материалов, нанопорошков. Эти плазмотроны отличаются тем, что используют так называемый принцип «обратного» вихря, который позволяет продлить срок службы плазменной горелки посредством эффективного охлаждения стенок плазмообразующим газом. Другое преимущество этой схемы — конструктивная простота. Впервые такие интенсивно закрученные течения использовались для индуктивных плазмотронов, где обычно применялись ламинарные потоки газа.

Анализ последних исследований и публикаций. Плазма является очень сложным явлением с физической точки зрения. Здесь присутствуют и тесно взаимосвязаны электромагнитные, термодинамические, гидродинамические и химические процессы, которые также не стационарны во времени. Поэтому задача моделирования плазменных явлений в плазменных устройствах на сегодняшний день не решена в полном объеме, несмотря на достаточное большое количество работ в этой области [1–4, 7, 9, 10, 12–16].

ЦЕЛЬ СТАТЬИ — анализ аэродинамической и тепловой структур потока в канале высокочастотного индукционного плазмотрона. С использованием математической модели плазменного высокочастотного плазмотрона, реализованной в программе CFD-ACE+© [6]. Численное моделирование позволило определить влияние режимных и геометрических характеристик на работу плазмотрона и выработать рекомендации по проектированию высокочастотных плазменных генераторов.

Изложение основного материала. Математическая модель, необходимая для моделирования данного плазмотрона, состоит из двух основополагающих подмоделей: модели турбулентного течения и модели магнитогидродинамического взаимодействия потока и магнитного поля.

Basic material. The mathematical model required for the simulation of the present plasma torch consists of two fundamental submodels: a model of turbulent stream and a model of magnet hydrodynamic interaction of flow and magnetic field.

For the inductive plasma in the present mathematical model a range of assumptions has been used which are justifiable for such plasma type and usually not appropriate in cases of low-temperature, discharge and nonequilibrium plasma:

1. Plasma is in the state of the local thermodynamic equilibrium;

2. The turbulence impact is considered by means of RNG k - ε turbulence model [8];

3. Plasma is optically transparent and losses on the radiation are defined only by the presence of the plasma-supporting gas;

4. The viscous heating is not considered in the equation of energy conservation;

5. The displaced currents which appear in the solenoid are not considered.

The physical behavior of plasma in the present model is calculated in a three-dimensional performance and described by the following main equations of mass, impulse and energy conservation:

$$\nabla \cdot (\rho v) = 0,$$

$$\nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g + F_L,$$

$$\nabla \cdot (\rho v h) = -\nabla \cdot \left(\frac{k_{eff}}{c_p} \nabla h \right) + \nabla \cdot \left(\sum_i \left(J_i + \frac{k}{c_p} \nabla \bar{Y}_i \right) \right) + P_j + Q_r,$$

where, ρ is density of the plasma flow; v is velocity; p is pressure; τ is the stress tensor; g is gravity force; h is the total stream enthalpy; k_{eff} is efficient thermal conductivity of the flow; c_p is heat capacity of the flow at constant pressure; Q_r are the volume losses of heat from radiation; Y_i is chemical components concentration; J_i is the diffusion current in the i -th component; P_j is the Joule heating; F_L is the Lorentz force.

The Lorentz force and Joule heating can be defined in the following way:

$$F_L = 0,5\pi(J \times B^*);$$

$$P_j = 0,5\pi(J \times E^*),$$

where J is a vector group of the current density induced in plasma; B is a vector group of the magnet field induction; E is a vector group of the electric field intensity. The «*» index means that the value is a complex conjugate number.

For the aerodynamic characteristics prediction the RNG-based k - ε – turbulence model was used. The transport equations have similar form as a standard k - ε – turbulence model:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\alpha_k \mu_{eff} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \end{aligned}$$

Для индукционной плазмы в данной математической модели был использован ряд допущений, позволяющих именно для такого вида плазмы и обычно не приемлемых в случаях низкотемпературной, разрядной и неравновесной плазмы:

1. Плазма находится в состоянии локального термодинамического равновесия.

2. Эффекты турбулентности учитываются при помощи RNG k - ε -модели турбулентности [8].

3. Плазма является оптически прозрачной, и потери на излучение определяются только присутствием плазмообразующего газа.

4. Вязкостный нагрев в уравнении сохранения энергии не учитывается.

5. Располагаемые токи, возникающие в соленоиде, не учитываются.

Физическое поведение плазмы в данной модели рассчитывается в трехмерной постановке и описывается основными уравнениями сохранения массы, импульса и энергии:

$$\nabla \cdot (\rho v) = 0;$$

$$\nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g + F_L;$$

$$\nabla \cdot (\rho v h) = -\nabla \cdot \left(\frac{k_{eff}}{c_p} \nabla h \right) + \nabla \cdot \left(\sum_i \left(J_i + \frac{k}{c_p} \nabla \bar{Y}_i \right) \right) + P_j + Q_r,$$

где ρ — плотность плазменного потока; v — скорость; p — давление; τ — тензор напряжений; g — гравитационная сила; h — суммарная энтальпия потока; k_{eff} — эффективная теплопроводность потока; c_p — изобарная теплоемкость потока; Q_r — объемные потери теплоты от излучения; Y_i — концентрация химических компонентов; J_i — диффузионный ток в i -м компоненте; P_j — Джоулев нагрев; F_L — сила Лоренца.

Силу Лоренца и Джоулев нагрев можно записать в следующем виде:

$$F_L = 0,5\pi(J \times B^*);$$

$$P_j = 0,5\pi(J \times E^*),$$

где J — векторный комплекс плотности тока, индуцированного в плазме; B — векторный комплекс индукции магнитного поля; E — векторный комплекс напряженности электрического поля. Индекс «*» означает, что величина является комплексно-сопряженным числом.

Для прогнозирования аэродинамических характеристик была использована RNG-разновидность k - ε -модели турбулентности. Уравнения переноса данной модели аналогичны уравнениям стандартной k - ε -модели турбулентности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\alpha_k \mu_{eff} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$+ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon.$$

In these equations, G_k represents the generation of turbulent kinetic energy depending on the mean velocity gradients, G_b is the generation of turbulent kinetic energy due to the buoyancy for the perfect gases, Y_M represents the contribution of the fluctuating dilatation in the compressible turbulence to the overall dissipation rate. The α_k and α_ε quantities are the inverse effective Prandtl numbers for k and ε , respectively, and S_k and S_ε are the user-defined source terms.

The electromagnetic field which was generated by the currents in coils (J_{coil}) of wire and inductive currents of plasma (J) is described by the Maxwell equations, written in the vector form:

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

where $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ is the magnet permeability of vacuum; σ is the plasma conductivity; $\omega = 2\pi f$ is the electromagnetic field frequency; A is the electromagnetic field potential.

The vector complex of the E electric field intensity and the vector complex of the B induction of magnetic field are defined by means of the A value with the help of the following equations:

$$E = -i\omega A;$$

$$B = \nabla \times A;$$

as well as the simplified Ohm's law:

$$J = \sigma E.$$

The inductive plasma torch with capacity of 50 kW the simulation of which is carried out [8] (Fig. 2) is developed for a wide range of tasks such as activation

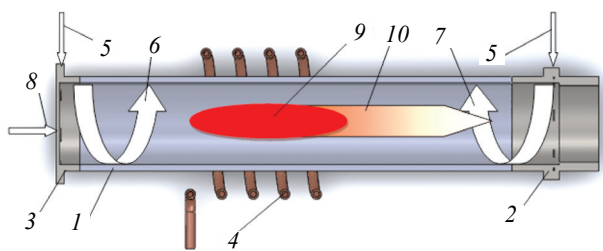


Fig. 2. Scheme of High-Frequency Inductive Plasma Torch Operation:

Рис. 2. Схема работы высокочастотного индукционного плазматрона:

1 — Inductive Section / индукционная секция; 2 — Output Section / выходная секция; 3 — Input Section / входная секция; 4 — Copper Coil / медная трубка; 5 — Plasma-Supporting Gas / плазмообразующий газ; 6 — Direct Vortex / прямой вихрь; 7 — Reverse Vortex / обратный вихрь; 8 — Fuel Supply / подача топлива; 9 — Plasma / плазма; 10 — Plasma Flame / плазменный факел

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$+ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon.$$

В этих уравнениях G_k представляет генерацию турбулентной кинетической энергии в зависимости от градиентов осредненных скоростей, G_b — генерацию турбулентной кинетической энергии в результате плавучести для идеальных газов; Y_M — вклад пульсационного расширения для сжимаемых потоков, величины α_k и α_ε высчитываются с использованием аналитического выражения, полученного в теории ренормирования с использованием эффективных чисел Прандтля для k и ε соответственно; S_k и S_ε — источники члены.

Электромагнитное поле, сгенерированное токами в витках (J_{coil}) обмотки и индуцированными токами плазмы (J), описывается уравнениями Максвелла, записанными в векторной форме:

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

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная проницаемость вакуума; σ — электропроводность плазмы; $\omega = 2\pi f$, A — частота и потенциал электромагнитного поля.

Векторный комплекс напряженности электрического поля E и векторный комплекс индукции B магнитного поля находят через величину A , используя следующие выражения:

$$E = -i\omega A;$$

$$B = \nabla \times A;$$

а также упрощенный закон Ома

$$J = \sigma E.$$

Моделируемый индукционный плазматрон мощностью 50 кВт (рис. 2) [8] разработан для широкого спектра задач, таких, как активация пылеугольной смеси с ее последующей газификацией, переработка отходов, нанесение покрытий. Он состоит из трех основных частей: входной секции 3, индукционной секции 1 и выходной секции 2. Индукционная секция представляет собой трубу из кварцевого стекла.

Плазмообразующий воздух 5 подается через завихритель выходной секции и образует обратный вихрь 7 [11].

Входная секция имеет завихритель, через который в плазматрон подается плазмообразующий газ 5 (аргон или воздух). Через отверстия в доннышке выходной секции можно подавать горючую смесь 8 либо другое топливо.

В данном случае расчет проводился для плазматрона, работающего на аргоне и воздухе. Аргон обладает повышенной по сравнению с воздухом, электропроводностью, следовательно, получить плазменный факел для него легче и требуется меньше энергетических затрат, что и было подтверждено численным экспериментом.

of coal-dust mixture with its further gasification, waste recycling, coating process. It consists of three main parts: the input section 3, the inductive section 1 and the output section 2. The inductive section is a pipe made of fused glass.

The feed of plasma-supporting gas 5 is carried out through the swirler of the output section, forming a reverse vortex 7 [11].

The input section has also a swirler through which the plasma-supporting gas 5 is supplied to the plasma torch (argon or air). It is possible to supply the dust mixture 8 or any other fuel through the holes in the output section base.

In this case, the calculation was carried out for the plasma torch which works on argon and air. Argon has high electric productivity comparing to air. Thus, it will be much easier for the argon to obtain a plasma torch and it requires less power consumption which was proved by the numerical experiment.

The properties of argon and air which are required for the numerical simulation are taken from the source [5].

In both cases the argon and air were supplied in the lower tangential admission 3 (see Fig. 2) to develop the reverse vortex stream with the flow rate of 2 g/s under the atmosphere pressure. The argon feed to the higher admission 5 develops the direct vortex flow 6. The calculations were carried out for the operation modes of the plasma torch with the frequency of 3.5 MHz and range of currents in the inductor from 1 to 5 A with the reverse and direct vortex of argon.

As a result of executed numerical experiments the following plasma jet characteristics were obtained. Figure 3 shows the temperature distribution along the plasma jet axis with the reverse vortex.

Also, according to Figure 3 and 4, *b* we can notice that while the distance increases from inductor, the plasma temperature goes down very quickly. A drop in temperature for the 5 A current is 65%. So we can make a conclusion that it is reasonable to lead up the waste feed stream as close to the plasma jet exit nozzle as possible in order to get maximum effect of its plasma activation.

From the graphs data and from Fig. 3 one can observe that the maximum temperature in the plasma torch reaches in the inductor field. We can make a conclusion that the plasma torch length should not exceed the general inductor length on more than 20% because of the reasonable usage of the inner plasma torch space and the losses increase of the total pressure in it.

At the same time the comparison of the impact of the type of the argon flow on the temperature field inside the plasma torch was carried out. As is clear from Fig. 4, *b* the reverse vortex allows concentrating the high temperature area closer to the axis of the plasma torch and provides the additional wall cooling while the direct vortex scheme (Fig. 4, *a*) gives high temperature zones close to the plasma torch shortening the lifetime of the plasma torch. So, the further calculations were carried out only for the plasma torches with the reverse vortex.

Свойства аргона и воздуха, необходимые для численного моделирования, взяты из источника [5].

В обоих случаях и аргон и воздух подавались в нижний тангенциальный подвод 3 (см. рис. 2) для создания обратного вихревого течения с расходом 2 г/с при атмосферном давлении. Подача аргона в верхний подвод 5 отсутствовала. Расчеты проводились для режимов работы плазматрона с частотой 3,5 МГц и диапазона токов в индукторе от 1 до 5 А.

В результате проведенных численных экспериментов были получены характеристики плазматрона. На рис. 3 показано распределение температуры по оси плазматрона, работающего с «обратным» вихревым течением.

Также из рис. 3 и 4, *б* заметно, что по мере удаления от индуктора температура плазмы достаточно резко падает. Для тока 5 А падение температуры составляет 65%. Поэтому можно сделать вывод, что горючую смесь целесообразно подводить как можно ближе к выходному соплу плазматрона, чтобы получить максимальный эффект ее плазменной активации.

Из данных графиков, а также из рис. 3 видно, что максимальные температуры в плазматроне достигаются в области индуктора, из чего можно сделать вывод, что длина плазматрона не должна превышать общую длину индуктора более чем на 20% в связи с рациональным использованием внутреннего пространства плазматрона и увеличением потерь полного давления в нем.

Проведено сравнение влияния типа течения аргона на температурное поле в плазматроне. Из рис. 4, *б* видно, что «обратный» вихрь помогает сконцентрировать зону высоких температур ближе к оси плазматрона и обеспечивает дополнительное охлаждение стенок, по сравнению с «прямым» вихревым течением (рис. 4, *а*), которое создает высокотемпературные зоны ближе к стенкам плазматрона, тем самым сокращая его ресурс. Таким образом, дальнейшие расчеты проводились только для плазматронов с «обратным» вихревым течением.

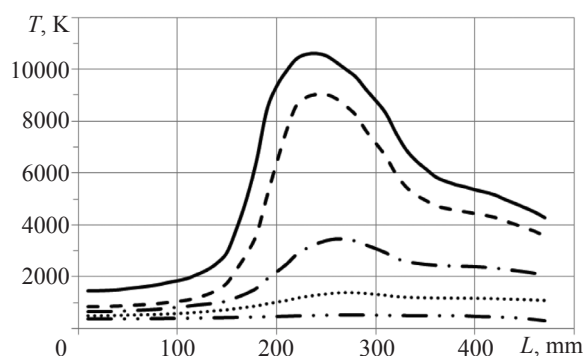


Fig. 3. Temperature Distribution along the Plasma Jet Axis, which Operates on Argon:

Рис. 3. Распределение температуры по оси плазматрона:
— · · — — 1 А; ····· — 2 А; — · — 3 А;
— — — — 4 А; — — — — 5 А

As a result of calculations we also got the dependence of the induced current density distribution along the plasma jet axis (Fig. 5–6).

It should be noted that there is a rapid increase of induced current density in a range of current within the inductor from 4 A and 3.5 MHz current frequency in operated on argon plasma jet (Fig. 5). This indicates a so-called plasma “breakdown”. We can notice a similar rapid increase of the plasma jet operated on air for current of 4 A with 7 MHz frequency. The parameters assessment of the “breakdown” current is an essential characteristic of plasma jet operation.

Also the numerical experiment allowed executing the assessment of thermal efficiency of inductive plasma jet according to the thermal and accepted powers.

The efficiency calculation was executed according to the following formula:

$$\eta = \frac{P_{thermal}}{P_{induct}} \cdot 100\%,$$

where $P_{thermal}$ is a thermal power in the output plasma jet section, Wt; P_{induct} is an inductive power absorbed by the plasma torch, Wt.

В результате расчетов также была получена зависимость распределения плотности индуцированных токов по оси плазматрона (рис. 5, 6).

Следует отметить резкий рост плотности индуцированных токов в диапазоне тока на индукторе от 4 А и частотой тока 3,5 МГц в плазматроне, работающем на аргоне (см. рис. 5), что указывает на так называемый «пробой» плазмы. Аналогичный скачок для плазматрона, работающего на воздухе, наблюдается уже для тока 4 А с частотой 7 МГц. Оценка параметров тока «пробоя» является важной характеристикой работы плазматрона.

Численный эксперимент позволил провести оценку теплового КПД индукционного плазматрона по соотношению тепловой и поглощенной мощностей. Расчет КПД производился по формуле

$$\eta = \frac{P_{thermal}}{P_{induct}} \cdot 100\%,$$

где $P_{thermal}$ — тепловая мощность в выходном сечении плазматрона, Вт; P_{induct} — индуцированная мощность, поглощенная плазменным факелом, Вт.

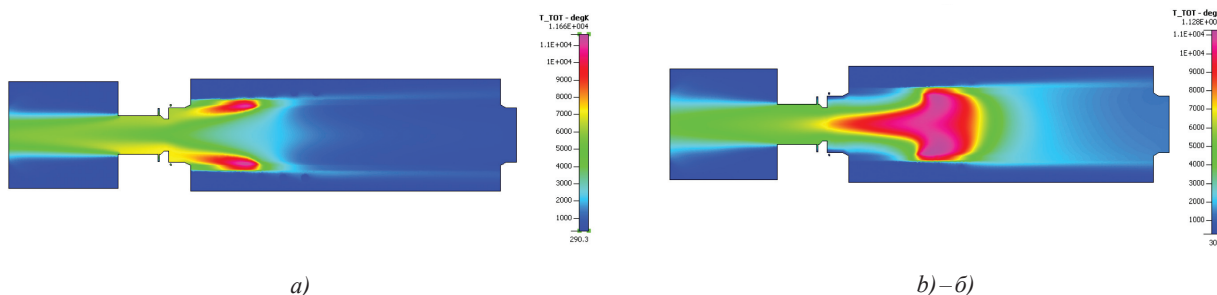


Fig. 4. Temperature Field in Plasma Jet Section, which Operates on Argon for 5 A Inductor Currents with Direct Vortex (a) and Reverse Vortex (b)

Рис. 4. Поле температур в сечении плазматрона, работающего на аргоне, для тока на индукторе 5 А с «прямым» (a) и «обратным» (б) вихрями

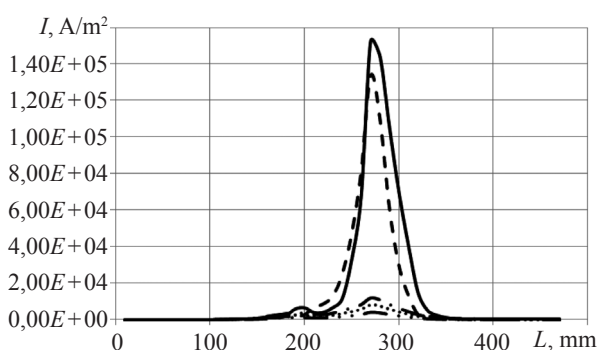


Fig. 5. Induced Current Density Distribution along the Plasma Jet Axis, which Operates on Argon, Inductor Frequency is 3.5 MHz with Reverse Vortex:

Рис. 5. Распределение плотности индуцированных токов по оси плазматрона:
 — · · — 1 A; ····· 2 A; — · — 3 A;
 — — — 4 A; — — — 5 A

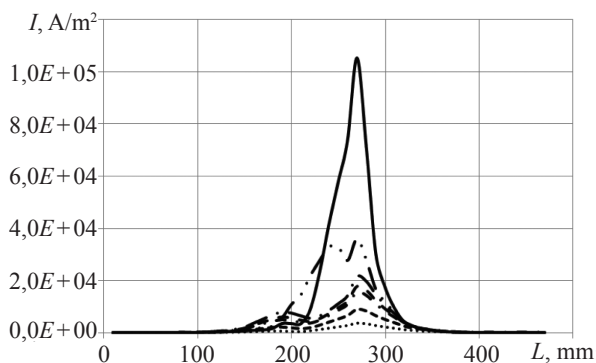


Fig. 6. Induced Current Density Distribution along the Plasma Jet Axis, which Operates on Air, Inductor Current Strength is 4 A with Reverse Vortex:

Рис. 6. Распределение плотности индуцированных токов по оси плазматрона, работающего на воздухе:
 ····· 1 MHz / 1 МГц; — — — 2 MHz / 2 МГц; — · — 3,5 MHz / 3,5 МГц; — — — 4 MHz / 4 МГц; — · — 5 MHz / 5 МГц;
 — — — 6 MHz / 6 МГц; — — — 7 MHz / 7 МГц

The thermal power is calculated according to the formula

$$P_{thermal} = g \cdot c_p (T_{out} - T_{in}) \cdot Wt,$$

where g is an argon consumption, kg/s; T_{out} is a plasma jet output temperature, K; T_{in} is a plasma jet input argon temperature, K; c_p is an average argon specific heat in the temperature range from T_{in} to T_{out} (J/kg·K).

For the plasma jet operated on argon the current of 5 A corresponds to the accepted power of plasma torch of 10 kW and thermal power of 5 kW. Correspondingly, the plasma jet efficiency is about 50 %. In the same time the efficiency of plasma jet operated on air with the inductor current of 4 A but with frequency of 7 MHz is 75 %.

CONCLUSION. 1. The high temperature operation modes along with compact dimensions make the plasma torches of such construction optimal for the stabilization of combustion processes as well as for the recycling processes at the mobile seaport recycling complexes.

2. The calculations demonstrated convincingly the advantage of the operation of plasma torches with reverse vortex flow over plasma torches with "direct" vortex flow.

3. The output plasma jet nozzle temperatures can be up to 5000 K for both argon and air. We should only choose the proper values of the current strength and frequency.

Combustion mixture or other fuel is reasonable to lead up as close to the plasma jet output section as possible in order to get the maximum effect of its plasma activation, since the temperature goes down rapidly in case of removal from the nozzle.

The plasma torch capacity depends mostly on the inductor current frequency. In such a way, the inductor current strength increase from 4 A to 6 A with constant frequency of 3.5 MHz for the plasma jet operated on air gives thermal power growth from 4.3 kW to 8.2 kW. The frequency growth from 3.5 to 7 MHz with constant current strength of 4 A gives power growth from 4.3 kW to 26.5 kW. So it is reasonable to increase the frequency for plasma jet capacity and efficiency increment, but not the inductor current strength.

Тепловую мощность рассчитывали по формуле

$$P_{thermal} = g \cdot c_p (T_{out} - T_{in}) \cdot Вт,$$

где g — расход аргона, кг/с; T_{out} — температура на выходе из плазматрона, К; T_{in} — температура аргона на входе в плазмотрон, К; c_p — средняя теплоемкость аргона в диапазоне температур от T_{in} до T_{out} Дж/(кг·К).

Для плазмотрона, работающего на аргоне, току 5 А соответствует поглощенная мощность плазменного факела 10 кВт и тепловая — 5 кВт. Соответственно КПД плазмотрона составляет около 50 %. В то же время КПД плазмотрона, работающего на воздухе с током на индукторе 4 А, но частотой 7 МГц, равен 75 %.

ВЫВОДЫ. 1. Высокотемпературные режимы работы наряду с компактными размерами делают плазмтроны данной конструкции оптимальным и для стабилизации процессов горения и переработки отходов в мобильных припортовых перерабатывающих комплексах.

2. Расчеты продемонстрировали преимущество работы плазмтронов с «обратным» вихревым течением над плазмтронами с «прямым» вихревым течением.

3. Температуры на выходе из сопла плазмтрона можно довести до 5000 К как для аргона, так и для воздуха, выбирая соответствующие значения силы и частоты тока.

Горючую смесь или другое топливо рационально подводить как можно ближе к выходному сечению плазмтрона, чтобы получить максимальный эффект ее плазменной активации, так как при удалении от сопла температура резко падает.

Мощность плазменного факела зависит в большей степени от частоты тока на индукторе. Так, увеличение силы тока на индукторе с 4 до 6 А при постоянной частоте 3,5 МГц для плазмтрона, работающего на воздухе, дает прирост тепловой мощности от 4,3 до 8,2 кВт, тогда как повышение частоты от 3,5 до 7 МГц при постоянной силе тока 4 А дает прирост мощности от 4,3 кВт до 26,5 кВт. Для увеличения мощности и КПД плазмтрона рационально увеличивать частоту, а не силу тока на индукторе.

Список литературы

- [1] Васильевский, С.А. Численное моделирование течений равновесной индукционной плазмы в цилиндрическом канале плазмтрона [Текст] / С.А. Васильевский, А.Ф. Колесников // Изв. АН СССР. Мех. жидк. газа. — 2000. — №5. — С. 164–173.
- [2] Власов, В.И. Теоретическое исследования течения высокотемпературного газа в разрядной и рабочей камерах ВЧ-плазмтрона [Текст] // Космонавтика и ракетостроение. — М. : ЦНИИ Машиностроения, 2001. — №23. — С. 18–26.
- [3] Горшков, А.Б. Численное моделирование обтекания моделей в струе высокочастотного плазмтрона [Текст] / А.Б. Горшков // Космонавтика и ракетостроение. — М. : ЦНИИ Машиностроения, 2004. — №3(36). — С. 54–61.
- [4] Сахаров, В.И. Численное моделирование течений в индукционном плазмтроне и теплообмена в недорасширенных струях воздуха для условий экспериментов на установке ВГУ-4 (ИПМех РАН) [Электронный ресурс] / В.И. Сахаров // Физико-химическая кинетика в газовой динамике: электронный журнал. — 2007. — Т. 5. — 23 с. — Режим доступа : <http://www.chemphys.edu.ru/article/50/>.
- [5] Теория столба дуги / В.С. Энеглшт, В.Ц. Гурович, Г.А. Десятков [и др.]. — Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1990. — Т. 1. — 376 с.

- [6] Advanced CFD & Multiphysics with complete solution & coupling capability. — Access mode: <http://www.esi-group.com/products/multiphysics/ace-multiphysics-suite>.
- [7] Numerical Modelling of RF–RF Hybrid Plasma Torches and Parametric Study for Various Geometric, Flow and Electric Configurations [Text] / D. Bernardi, V. Colombo, G. G. M. Coppa, E. Ghedini, A. Mentrelli // 24 The European Physical Journal. Progress in Plasma Processing of Materials, Proceedings of the 6-th International Thermal Plasma Processing Conference, Strasbourg (France), May 30–June 2. — New York : Wallingford, Begell House. — 2001. — P. 339–346.
- [8] **Choudhury, D.** Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling [Text] / D. Choudhury // Fluent Inc. Technical Memorandum TM-107. — 1993.
- [9] **Gordeev, A. N.** Comparative Characterization of the IPG-4 Inductive Plasmatron in Subsonic and Supersonic Regimes of Air Plasma Flows [Text] / A. N. Gordeev, A. F. Kolesnikov, S. V. Kononov // Int. Conf. on Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2004), Novosibirsk, Russia. Proceedings. Part I. — Novosibirsk : Publishing House "Nonparel". — 2004. — P. 106–111.
- [10] **Korolev, Yu. D.** Non-steady State Processes in a Plasma Pilot for Ignition and Flame Control [Text] / Yu. D. Korolev, I. B. Matveev // IEEE Trans. Plasma Sci. — 2006. — Vol. 34, nr 6. — P. 2507–2513.
- [11] **Matveev, I.** Numerical Optimization of the Tornado Combustor Aerodynamic Parameters [Text] / I. Matveev, S. Serbin, G. Mostipanenko // 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (Reno, Nevada, USA, 8–11 January 2007). — AIAA 2007-391. — 12 p.
- [12] Numerical simulation of sub- & supersonic flows into inductive plasmatrons [Text] / S. V. Utyuzhnikov, A. V. Konyukhov, D. V. Rudenko, S. A. Vasil'evskii, A. F. Kolesnikov, I. S. Pershin, O. Chazot // 16-th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference. — Orlando, USA. — 2003.
- [13] Plasma Fuel Nozzle as a Prospective Way to Plasma-Assisted Combustion [Text] / I. B. Matveev, S. A. Matveeva, E. Y. Kirchuk, S. I. Serbin, V. G. Bazarov // IEEE Trans. Plasma Sci. — 2010 — Vol. 38, nr. 12. — P. 3313–3318.
- [14] **Serbin, S. I.** Features of liquid-fuel plasma-chemical gasification for diesel engines [Text] / S. I. Serbin // IEEE Trans. Plasma Sci. — 2006. — Vol. 34, nr. 6. — P. 2488–2496.
- [15] **Serbin, S. I.** Modeling and Experimental Study of Operation Process in a Gas Turbine Combustor with a Plasma-Chemical Element [Text] / S. I. Serbin // Combustion Science and Technology. — 1998. — Vol. 139. — P. 137–158.
- [16] **Serbin, S. I.** Investigations of the Working Process in a "Lean-Burn" Gas Turbine Combustor With Plasma Assistance [Text] / S. I. Serbin, I. B. Matveev, G. B. Mostipanenko // Trans. Plasma Sci. — 2011. — Vol. 39, nr. 12. — P. 3331–3335.

© С. И. Сербин, А. Б. Мостипаненко

Статью рекомендует в печать
д-р техн. наук, проф. Г. Ф. Романовский

КНИЖНАЯ ПОЛКА



В сборнике рассмотрены основные этапы создания, становления и развития кафедры турбин Машиностроительного института Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова. Приведены материалы об ученых и педагогах, которые внесли заметный вклад в процесс становления кафедры.

Становление кафедры совпало с интенсивным внедрением газотурбинных двигателей в отечественную корабельную и судовую энергетику. Это способствовало тесному сотрудничеству кафедры турбин с организациями и предприятиями, которые занимались проектированием и производством подобной техники. В период с 1963 по 1988 г. кафедрой было выпущено более 1800 инженеров-механиков по специальности 0521 «Турбиностроение».

Кафедра турбин гордится своими многочисленными выпускниками, аспирантами и бывшими сотрудниками, успешно реализовавшими или реализующими в настоящее время свои знания и творческий потенциал в Национальном университете кораблестроения имени адмирала Макарова, Научно-производственном комплексе газотурбостроения «Зоря»–«Машпроект».

